

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDRÉ MANSUR ROCCO

AVALIAÇÃO DA ROBUSTEZ DE HISTÓRICOS DE VENTOS NA OTIMIZAÇÃO DE  
CARTEIRAS DE PARQUES EÓLICOS COMPLEMENTARES

CURITIBA

2017

ANDRÉ MANSUR ROCCO

AVALIAÇÃO DA ROBUSTEZ DE HISTÓRICOS DE VENTOS NA OTIMIZAÇÃO DE  
CARTEIRAS DE PARQUES EÓLICOS COMPLEMENTARES

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração Sistemas de Potência, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Prof. Elizete Maria Lourenço  
Coorientador: Dr. Franklin Kelly Miguel

CURITIBA

2017

---

R671a            Rocco, André Mansur

Avaliação da robustez de históricos de ventos na otimização de carteiras de parques eólicos complementares. / André Mansur Rocco – Curitiba (PR), 2017.

70 p.: il. color.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Profª. Dra. Elizete Maria Lourenço.

Coorientador: Dr. Franklin Kelly Miguel

Bibliografia: p. 68-70.

1. Engenharia Elétrica. I. Lourenço, Elizete Maria. II. Miguel, Franklin Kelly. III. Universidade Federal do Paraná. IV. Título.

CDD: 621.3

---




MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA  
ELÉTRICA

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ANDRÉ MANSUR ROCCO** intitulada: **Avaliação da Robustez de Histórico de Ventos na Otimização de Carteiras de Parques Eólicos Complementares**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.


A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 26 de Fevereiro de 2018.

  
ELIZETE MARIA LOURENÇO  
Presidente da Banca Examinadora

  
DIOGO MAC CORD DE FARIA  
Avaliador Externo  
(por videoconferência)  
  
CLODOMIRO UNSIHUAY-VILA  
Avaliador Interno

  
THELMA SOLANGE PIAZZA FERNANDES  
Avaliador Interno

  
FRANKLIN KELLY MIGUEL  
Avaliador Externo

*Às minhas filhas, Helena e Manuela.*

## **AGRADECIMENTOS**

À minha professora orientadora, Phd Elizete Maria Lourenço, por ter me aceitado como seu orientando, confiando no meu projeto e me orientando na escrita da dissertação, na publicação do artigo, no suporte para minha defesa e por ter me alentado em diversos momentos.

Ao meu coorientador, Dr. Franklin Kelly Miguel, que foi quem me impulsionou a fazer esse mestrado, e me deu um grande suporte técnico durante a escrita da dissertação.

À pesquisadora Dra. Ana Paula Oening, que me auxiliou nas simulações.

À minha esposa, Cristiani Maria Kusma Rocco, por todo apoio, paciência e compreensão.

Para meu amigo Dr. Leandro Andrade Nacif, pelos longos fins de semana estudando métodos de otimização.

À banca: professor Phd Clodomiro Unsihuay-Vila, professora Phd Thelma Solange Piazza Fernandes e professor Phd Diogo McCord de Faria, pelas dicas de melhoramento.

À Copel, por ter apoiado meu curso de Mestrado na UFPR.

E a todos aqueles que, de uma ou de outra forma contribuíram para o êxito dessa jornada.

*Para Triunfar É Necessário Vencer, Para Vencer É  
Necessário Lutar, Para Lutar É Necessário Estar Preparado,  
Para Estar Preparado É Necessário Prover-Se De Uma Grande  
Inteireza De Ânimo E De Uma Paciência A Toda A Prova.*

*RAUMSOL*

## RESUMO

A teoria de portfólios de Markowitz foi desenvolvida em 1952 para aplicação em carteiras de títulos de investimentos. Na escolha de títulos de investimentos de comportamento diferentes, essa teoria auxilia o investidor a montar uma carteira, composta por esses títulos, com um nível de risco reduzido. Esse trabalho verificou o comportamento de carteiras de parques eólicos complementares em função da variação dos históricos de vento, por meio da teoria de portfólios de Markowitz. Para isso, tomou-se um período de históricos de ventos entre 5 a 20 anos, cujos dados foram obtidos da empresa Vortex. Os dados de ventos utilizados na simulação, foram obtidos das seguintes coordenadas geográficas: Parnaíba, Parada, São João, Medonho, Macambira, Forquilha, Tavares, Sertânia, Afrânio, Palmas, Quilombo, Tubarão, Osório, Dom Pedrito, Estreito, Palmar, Itaguaçu, Boninal, Jacaraci, Olho D'água, Riachuelo e Anta. Essas 22 coordenadas geográficas, que são consideradas no presente trabalho como parques eólicos, formam infinitos conjuntos de parques eólicos complementares, denominado cada conjunto de carteira, das quais se selecionou 10 para delimitar a curva de fronteira eficiente. Sendo assim, analisou-se o comportamento da carteira de menor risco e menor retorno para todos os tranches e verificou-se que apesar de existir uma pequena variação na composição desta ao longo desses tranches, manteve-se uma representatividade de alguns parques que a compõe. Logo, percebe-se que os históricos de períodos curtos de ventos se mostram consistentes para formação de carteiras ótimas de parques eólicos complementares, comprovando que não existe necessidade de um histórico longo. Assim, possibilita-se fornecer ao agente gerador subsídios para decidir investimentos frente a dados de geração de energia a partir de mapas eólicos mais recentes. Os resultados obtidos evidenciam a viabilidade e eficácia da presente proposta.

**Palavras Chave:** Teoria de Portfólio de Markowitz, Histórico de Ventos, Carteiras de Parques Eólicos, Otimização de Recursos.



## ABSTRACT

Markowitz Portfolio Theory was developed in 1952 to be applied to portfolios of investment stocks. When choosing investment stocks with different behaviors, the theory helps the investor constitute a portfolio - made up of these stocks - with lower risk. The present work has verified the behavior of portfolios of complementary power generation wind farms based on the variation of wind records, drawing on Markowitz Portfolio Theory. To do so, we have drawn on wind records from a five to twenty-year term, data acquired by the company Vortex. The wind data utilized in the simulation were taken from the following geographic locations: Parnaíba, Parada, São João, Medonho, Macambira, Forquilha, Tavares, Sertânia, Afrânio, Palmas, Quilombo, Tubarão, Osório, Dom Pedrito, Estreito, Palmar, Itaguaçu, Boninal, Jacaraci, Olho D'água, Riachuelo and Anta. These 22 geographic locations, regarded as wind farms in the present work, make up endless sets of complementary power generation wind farms, with each set constituting a portfolio, and from which 10 have been selected to determine the efficient frontier. Therefore, the behavior of the portfolio with lower risk and lower return has been analyzed for all tranches. It was verified that, even though there is a minor variation in the constitution of this portfolio over these tranches, there was representation of some of the wind farms that make it up. Consequently, we notice that short-term wind records constitute consistent data for the construction of excellent portfolios of complementary power generation wind farms, demonstrating that long-term records are not required. As a result, it is possible to offer subsidies to power generation companies so that they can decide upon investments according to power generation data, based on more recent wind maps. The results show the feasibility and effectiveness of the present proposal.

**Keywords:** Markowitz Portfolio Theory, Wind Records, Wind Farms Portfolios, Resource Optimization.

## LISTA DE SIGLAS

ACL	AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO LIVRE
ACR	AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO REGULADA
ANEEL	AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA
BNDES	BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO
CCEAR	CONTRATO DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO AMBIENTE REGULADO
CCEE	CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
COPEL	COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA
ELETROBRÁS	CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS
EPE	EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA
IRF	TAXA DE JUROS LIVRE DE RISCO
LMC	LINHA DO MERCADO DE CAPITAIS
MRE	MECANISMO DE REALOCAÇÃO DE ENERGIA
PCH	PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA
PIE	PRODUTOR INDEPENDENTE DE ENERGIA
PLD	PREÇO DA LIQUIDAÇÃO DAS DIFERENÇAS
PROINFA	PROGRAMA DE INCENTIVO ÀS FONTES ALTERNATIVAS
SIN	SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL
TUSD	TARIFA DE USO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO
TUST	TARIFA DE USO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – EVOLUÇÃO DA POTÊNCIA INSTALADA DE PARQUES EÓLICOS NO BRASIL (EM MW) .....	25
FIGURA 2 – EVOLUÇÃO DO PERCENTUAL DE PARTICIPAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA.....	26
FIGURA 3 - PROJEÇÃO DA EVOLUÇÃO DE POTÊNCIA INSTALADA DE EÓLICAS NO BRASIL, EM MW. ....	28
FIGURA 4 - RISCO VS RETORNO DE UM POSSÍVEL PORTFÓLIO MARKOWITZ (1959).....	34
FIGURA 5 - CURVA DE INDIFERENÇA RISCO VS RETORNO .....	35
FIGURA 6 - PORTFOLIO EFICIENTE .....	36
FIGURA 7 - A COMBINAÇÃO DE VALORES LIVRES SEM RISCO COM A FRONTEIRA EFICIENTE E LINHA DO MERCADO DE CAPITAIS .....	37
FIGURA 8 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS COORDENADAS SELECIONADAS DO VORTEX.....	42
FIGURA 9 - CURVA DE POTÊNCIA CALCULADA .....	45
FIGURA 10 - MÉDIA-VARIÂNCIA - FRONTEIRA EFICIENTE PARA 5 ANOS.....	51
FIGURA 11 - COMPOSIÇÃO DE CADA CARTEIRA - PESO DAS DIFERENTES USINAS PARA 5 ANOS .....	52
FIGURA 12 - MÉDIA VARIÂNCIA - FRONTEIRA EFICIENTE PARA 10 ANOS.....	54
FIGURA 13 - COMPOSIÇÃO DE CADA CARTEIRA - PESOS DAS DIFERENTES USINAS PARA 10 ANOS .....	55
FIGURA 14 - MÉDIA VARIÂNCIA - FRONTEIRA EFICIENTE PARA 15 ANOS.....	57
FIGURA 15 - COMPOSIÇÃO DE CADA CARTEIRA - PESO DAS DIFERENTES USINAS PARA 15 ANOS .....	58
FIGURA 16 - MÉDIA VARIÂNCIA - FRONTEIRA EFICIENTE PARA 20 ANOS.....	60
FIGURA 17 - COMPOSIÇÃO DE CADA CARTEIRA - PESO DAS DIFERENTES USINAS PARA 20 ANOS .....	61
FIGURA 18 - COMPARAÇÃO ENTRE AS FRONTEIRAS EFICIENTES DAS SIMULAÇÕES.....	62

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PERSPECTIVA DE CRESCIMENTO DA CAPACIDADE INSTALADA POR FONTE DE GERAÇÃO RENOVÁVEL NO HORIZONTE ENTRE 2016 E 2024 .....	27
TABELA 2 - DADOS DE VENTOS DAS COORDENADAS .....	43
TABELA 3 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO .....	50
TABELA 4 - COMPOSIÇÃO DA CARTEIRA 1 NO TRANCHE 1 .....	53
TABELA 5 - RESULTADOS DO TRANCHE 2.....	53
TABELA 6 - COMPOSIÇÃO DA CARTEIRA 1 NO TRANCHE 2 .....	55
TABELA 7 - RESULTADOS DO TRANCHE 3.....	56
TABELA 8 - COMPOSIÇÃO DA CARTEIRA 1 NO TRANCHE 3 .....	58
TABELA 9 - RESULTADOS DO TRANCHE IV .....	59
TABELA 10 - VARIAÇÃO DA CARTEIRA 1 AO LONGO DOS TRANCHES .....	61

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	A PESQUISA .....	19
1.2	OBJETIVOS.....	20
1.2.1	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>20</b>
1.2.2	<b>Objetivo Específicos.....</b>	<b>20</b>
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	20
<b>2</b>	<b>A INSERÇÃO DAS FONTES EÓLICAS NO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO</b>	<b>22</b>
2.1	INTRODUÇÃO.....	22
2.2	VISÃO GERAL DO SETOR ELÉTRICO .....	23
2.3	A INSERÇÃO DA GERAÇÃO EÓLICA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA .....	24
2.4	PERSPECTIVAS DE CRESCIMENTO .....	27
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	28
<b>3</b>	<b>APLICAÇÃO DA TEORIA DE MARKOWITZ NA ESCOLHA DE CARTEIRAS ÓTIMAS DE PARQUES EÓLICOS COMPLEMENTARES.....</b>	<b>30</b>
3.1	INTRODUÇÃO.....	30
3.2	TEORIA DE PORTFÓLIOS DE MARKOWITZ.....	30
3.3	DETERMINAÇÃO DO CONJUNTO EFICIENTE .....	33
3.4	ESCOLHENDO O MELHOR PORTFÓLIO .....	34
3.5	APLICAÇÃO DA TEORIA DE MARKOWITZ PARA A SELEÇÃO DE PORTFÓLIOS EÓLICOS.....	38
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	39
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA PROPOSTA.....</b>	<b>40</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	40
4.2	CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	40
4.3	DADOS DE ENTRADA .....	41
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	48
<b>5</b>	<b>SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....</b>	<b>49</b>
5.2	SIMULAÇÃO 1: 5 ANOS.....	49

5.3	SIMULAÇÃO 2: 10 ANOS.....	53
5.4	SIMULAÇÃO 3: 15 ANOS.....	56
5.5	SIMULAÇÃO 4: 20 ANOS.....	59
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS .....</b>	<b>64</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>66</b>
	<b>ANEXO – INSTITUIÇÕES DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO ...</b>	<b>69</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Conforme Leite (2007), por energia limpa se entende uma forma de energia que, para sua produção, não leve a emissão de gases ou outros resíduos nocivos, ou que contribuam para o chamado efeito estufa. As fontes que se enquadram nessa categoria são: solar, eólica, geotérmica, hidráulica e maremotriz.

Por energia renovável se entendem as formas de energia que ocorrem na natureza e que são naturalmente reabastecidos na medida em que são mantidas ou substituídas pela natureza. Enquadram-se na definição as energias vindas diretamente do sol (como a fotovoltaica), do vento, da biomassa, do movimento das águas em geral (maré, ondas, desníveis, etc.).

Em contraposição, as energias não renováveis são aquelas disponíveis na natureza, cuja formação se deu em longos intervalos de tempo (eras geológicas), de modo que os materiais a que estão associadas não podem ser repostos com a velocidade exigida pelo consumo. Nesse caso tem-se o petróleo, gás natural, carvão mineral, urânio, etc.

Energia eólica é a energia dos ventos. Seu aproveitamento ocorre por meio de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de eletricidade. Como é uma energia que depende dos ventos, pode-se dizer que é uma fonte intermitente, nos períodos intradiários e volátil, nos períodos mensais pelo fato de não estar disponível 100% do tempo.

Segundo a AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL)<sup>1</sup>, a primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi implantada na Dinamarca, em 1976. Atualmente mais de 30 mil turbinas eólicas estão em operação no mundo. Gradualmente, os aperfeiçoamentos tecnológicos têm possibilitado redução de custos e melhor desempenho e confiabilidade dos equipamentos.

Atualmente, o Brasil é considerado um dos maiores produtores mundiais de energia eólica. Consta no site da AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA

---

<sup>1</sup> AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia\\_eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf). Acesso em: 15 nov. 2017.

2017)<sup>2</sup>, na seção de aplicações que a primeira turbina de energia eólica do Brasil foi instalada em Fernando de Noronha em 1992. Dez anos depois, o governo criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) para incentivar a utilização de outras fontes renováveis, como eólica, biomassa e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). O Brasil realizou o seu primeiro leilão de energia eólica em 2009, em um movimento para diversificar a sua matriz de energia Abeeolica (2017)<sup>3</sup>.

Desde a criação do Proinfa em 2002, a produção de energia eólica no Brasil aumentou de 22 MW em 2003 para quase 13 GW de potência instalada no final de 2017, representando um salto de participação de 0,03% para mais que 7% na matriz de energia elétrica nacional, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e com o Ministério das Minas e Energia (MME), (2018). Segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, publicado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás, o território brasileiro tem capacidade para gerar até 140 GW de energia eólica (CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL), 2017).

Ricosti (2011) avalia a possibilidade de substituir na matriz brasileira, as usinas térmicas pelas eólicas. Porém se considerou apenas custos (em MWh), não levando em conta que usinas eólicas são fontes intermitentes e que, portanto, não auferem segurança no suprimento.

Na dissertação de Ribeiro (2013) foi proposto um sistema de apoio em leilões regulados para agentes geradores eólicos, avaliando riscos de contratação. Também evidenciou os riscos que esses agentes correm ao comercializar a energia no Ambiente de Contratação Livre.

Fernandez (2010) propõe o desenvolvimento de uma metodologia para a operação de portfólio de contratos de compra e venda de energia elétrica no ambiente

---

<sup>2</sup> AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia\\_eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf). Acesso em: 15 nov. 2017.

<sup>3</sup> AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: <http://www.abeeolica.org.br/energia-eolica-o-setor/>. Acesso em: 15 nov. 2017.



de contratação livre utilizando conceitos de otimização, em especial de programação linear, matemática financeira e estatística. Não trata especificamente de usinas eólicas e não se utiliza da teoria de portfólios de Markowitz.

Arfux (2004), através da teoria de portfólios de Markowitz, faz o gerenciamento de riscos na comercialização de energia elétrica, ou seja, propõe uma metodologia para análise de riscos de mercado, relativo à volatilidade associada aos preços, nas carteiras de contratos de comercialização de energia elétrica. Através da teoria de portfólios de Markowitz, quantifica esses riscos, e determina a composição eficiente do portfólio de contratos que forneça o maior retorno esperado. Esse trabalho, no entanto, não especifica os riscos de portfólios eólicos, mas trata os riscos de contratos de maneira genérica.

A dissertação de Bloot (2011) através de Markowitz, apresenta uma ferramenta para auxílio na decisão sobre Sazonalização de sobras energia para o ano seguinte, de geradores que fazem parte do Mecanismo de Realocação de Energia (MRE). Em seu trabalho é abordada a Garantia Física de usinas eólicas, porém não trata de complementariedade entre parques eólicos.

Ávila (2013), por sua vez, propõe um modelo de otimização da operação de usinas eólicas, determinando um despacho ótimo. Comparou a participação de uma usina eólica no MRE com outra que não participa, e propôs, inclusive, um Mecanismo de Realocação de Energia hídrico-eólico.

Em Pereira (2014), fez-se uma análise de portfólios de diversas fontes, utilizando Teoria Moderna de Portfólios para definir a estratégia de participação de cada usina típica no portfólio de geração, sob o aspecto do fluxo de caixa. Porém nesse trabalho não foi considerada a intermitência das fontes eólicas nem sua exposição no Ambiente de Contratação Livre. Também não se considerou o problema do histórico de ventos nem seu impacto em uma carteira de parques complementares de usinas eólicas.

O artigo *Optimal investment portfolio in renewable energy: The Spanish case*, 2009, de Jose Ignacio Muñoz, Agustín A. Sanchez de la Nieta, Javier Contreras, Jose L. Bernal-Agustín, apresenta um modelo para investir em energias renováveis no âmbito do mercado espanhol de eletricidade, de forma que o risco seja minimizado para o

investidor, enquanto os retornos são maximizados. O modelo descrito baseia-se em um modelo econômico para calcular os fluxos de caixa destinados a obter a taxa interna de retorno (TIR) das diferentes energias estudadas: energia eólica, fotovoltaica, PCH e termoeletricas. As TIR obtidas são consideradas os retornos dos investimentos, enquanto seu padrão os desvios são considerados riscos associados. Para minimizar o risco, é utilizado um sistema de equações lineares para analisar de maneira abrangente a utilização desses tipos de fontes que formariam um portfólio. A solução do sistema linear é verificada graficamente usando o método de fronteira eficiente para as diferentes opções de financiamento. As conclusões mais relevantes foram: Um aumento no financiamento externo leva a um aumento do retorno do portfólio devido à redução no investimento inicial e ao fato de que os fluxos de caixa em diferentes períodos são geralmente positivos, levando a um aumento acentuado na TIR para cada tipo de fonte. A partir da análise de risco em carteiras otimizadas, deduziu-se que um aumento no financiamento externo aumenta o risco da carteira devido ao aumento do retorno, em outras palavras: "quanto maior o retorno, maior o risco". As fontes que apresentam maiores riscos e menores retorno são as eólicas e PCHs. O risco de um portfólio otimizado pode ser inferior ao risco mínimo de cada tipo de fonte, desde que se tenha uma complementariedade entre as fontes.

Em *Optimal Wind Portfolios in Illinois*, 2012, de Benjamin A. Chupp, Emily Hickey e David G. Loomis, é feito um estudo para atender ao planejamento energético do estado de Illinois, EUA, que exige que até o ano de 2025, 25% da energia gerada seja feita por fontes renováveis, sendo que dessas, 75% por fontes eólicas. O problema da intermitência do vento pode ser superada por uma carteira geograficamente dispersa de parques eólicos. Utiliza-se, então, a teoria de portfólios de Markowitz para calcular a distribuição ótima de novos parques eólicos e atender aos objetivos do Illinois.

O artigo *Optimal wind power deployment in Europe — A portfolio approach*, 2010, de Fabien Roques, Celine Hiroux e Marcelo Saguan, traz que a diversificação geográfica dos parques eólicos pode suavizar as flutuações na geração de energia eólica e reduzir os custos associados ao equilíbrio e confiabilidade do sistema. O documento utiliza dados históricos de produção eólica de cinco países europeus

(Áustria, Dinamarca, França, Alemanha e Espanha) e aplica a teoria de portfólios de Markowitz para identificar as carteiras de países que minimizam a variação total da produção eólica para um determinado nível de Produção. As carteiras teóricas sem restrições mostram que os países (Espanha e Dinamarca) com o melhor recurso eólico ou cujo tamanho contribuem para suavizar a variabilidade da produção do país dominam as carteiras ótimas. A metodologia é então elaborada para obter portfólios restritos ótimos levando em consideração o potencial nacional de recursos eólicos e as restrições de transmissão e compará-los com as carteiras projetadas para 2020. Essas restrições limitam os ganhos de eficiência teórica potenciais da diversificação geográfica, mas ainda há espaço considerável para melhorar desempenho de carteiras atuais ou projetadas. Estes resultados evidenciam a necessidade de maior capacidade de interconexão transfronteiriça, uma maior coordenação das políticas europeias de apoio às renováveis e mecanismos de apoio renovável e projetos de mercado de eletricidade que ofereçam incentivos locais. Nessas condições, um mecanismo para o comércio de créditos de renováveis poderia ajudar a alinhar as carteiras de energia eólica com a dispersão geográfica teoricamente eficiente.

A tese de Miguel (2016) apresenta um método para a formação de carteiras<sup>4</sup> ótimas de parques eólicos complementares, utilizando a teoria de portfólios de Markowitz, com o objetivo de proteger o investidor da exposições de curto prazo, uma vez que usinas eólicas são fontes que não se tem o controle da volatilidade.

Nos trabalhos mencionados nesse tópico, nota-se a percepção da crescente participação da energia eólica na matriz energética brasileira, preocupação com a volatilidade da energia eólica, a ampla utilização da teoria de portfólios de Markowitz no setor de geração elétrica, inclusive na complementariedade entre parques eólicos. Todos se utilizam dos históricos de ventos ou energia gerada em suas análises. A

---

<sup>4</sup> Carteiras de parques eólicos complementares se constituem de uma gama de parques eólicos que geram energia complementares, ou seja, quando um parque que se localiza em determinada região gera energia por ter vento, o outro está parado e vice-versa, possibilitando que esse conjunto ou carteira esteja sempre gerando uma quantidade média de energia e nunca esteja parada. De forma similar, utiliza-se carteiras de ações, compostas por várias ações para mitigar riscos, de forma que quando uma tem queda em seu valor, a outra compensa.

preocupação do atual trabalho é verificar se os históricos de ventos influenciam de alguma forma nos resultados finais das análises que envolvem complementariedade de parques eólicos.

Para garantir contratos de compra e venda de energia de longo prazo, sem sofrer exposições no mercado de curto prazo, deve-se ter complementariedade entre os parques eólicos. Para se ter uma noção do comportamento futuro dos ventos, é feito uma análise dos históricos de ventos nas coordenadas geográficas que se quer analisar, pressupondo que exista um padrão. A contratação de históricos longos de ventos, em alguns casos, podem não estar disponíveis por falta de medições. Logo, no presente trabalho é verificado a possibilidade do uso de históricos de períodos mais curtos de ventos.

## 1.1 A PESQUISA

A partir de um projeto de pesquisa *Seleção Inteligente de Portfólios de Projetos Eólicos e de Pequenas Centrais Hidrelétricas*, encomendado pela Companhia Paranaense de Energia (Copel) ao Lactec, cujo objetivo era o de estudar a complementariedade entre parques eólicos utilizando-se da metodologia de Markowitz, identificou-se a dificuldade e custos de se obter históricos de ventos a partir de 20 anos para as regiões que se quer estudar. O presente trabalho pretende, justamente, responder à essa necessidade, por meio da teoria de portfólio de Markowitz, verificar a consistência de históricos de períodos curtos de ventos, com duração de 5 anos, no comportamento das carteiras de parques eólicos complementares. Para isso, é tomado um período de históricos de ventos entre 5 a 20 anos, cujos dados são obtidos da empresa Vortex<sup>5</sup>, gerando 4 simulações. Os dados de ventos obtidos são de coordenadas geográficas, mas que nesse trabalho serão tratadas como parques eólicos.

---

<sup>5</sup> Empresa sediada em Barcelona, na Espanha, que comercializa soluções de suporte relacionadas a tecnologias eólicas, solar e *offshore* para diversos fins. Particularmente para dados de vento, a empresa trabalha com um portfólio de produtos como sistemas específicos para o posicionamento de torres meteorológicas, projetos de fazendas eólicas e séries históricas de dados.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a o impacto da variação dos históricos de vento para a obtenção de carteiras ótimas de parques eólicos complementares, utilizando a teoria de Markowitz.

### 1.2.2 Objetivo Específicos

- Apresentar a teoria de portfólio de Markowitz.
- Verificar a possibilidade do uso de histórico de vento reduzido para obtenção de carteiras otimizadas.
- Apresentar as fronteiras eficientes para os históricos de vento analisados.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse trabalho tem sua pesquisa estruturada da seguinte forma:

O capítulo 1 Introdução: apresenta-se uma revisão bibliográfica que situa o problema de pesquisa; destacam-se os objetivos e a metodologia.

O capítulo 2 apresenta a inserção e projeções das fontes eólicas no Setor Elétrico Brasileiro (SEB), trazendo uma visão geral e um breve histórico desse Setor.

O capítulo 3 apresenta a Teoria de Portfólios Markowitz e sua aplicação na escolha de carteiras ótimas de parques eólicos complementares, possibilitando determinar o conjunto eficiente para se escolher o melhor portfólio.

O capítulo 4 apresenta a metodologia proposta e os dados de entrada, contemplando um roteiro de passos que foram executados para atender o problema de pesquisa.

O capítulo 5 tem-se as simulações e resultados propriamente ditos, onde são discutidos os resultados das simulações.

Por último, Conclusões: apresenta-se as conclusões gerais e sugestões para trabalhos futuros.

## **2 A INSERÇÃO DAS FONTES EÓLICAS NO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

Esse capítulo discute a expansão do setor eólico brasileiro, que se deu via mercado regulado, com subsídios e incentivos governamentais. Alguns desses subsídios e incentivos são, conforme Tolmasquim 2017:

- Descontos da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão (TUST) de 50%, pela Lei 9.427, de 26 de dezembro de 1996.
- Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA): subsídio para incentivar a participação da energia elétrica produzida por fontes alternativas, como a eólica, a biomassa e as pequenas centrais hidrelétricas.
- Desonerações fiscais – em especial, a implantação do Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (Reidi), com a desoneração de tributos federais sobre a receita dos projetos – e a redução do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) promovida por alguns estados sobre os equipamentos e componentes produzidos em seu território;
- Enquadramento dos projetos no regime de tributação de lucro presumido, em vez de lucro real;
- Condições de financiamento diferenciadas do BNDES para projetos de energia eólica, com desenvolvimento de uma metodologia específica de credenciamento de aerogeradores.

No entanto esse crescimento foi desordenado, ou seja, não se buscou uma complementariedade para a fonte eólica, segundo a disponibilidade energética.

## 2.2 VISÃO GERAL DO SETOR ELÉTRICO

No ano de 1962 foi criada a Centrais Elétricas Brasileiras (Eletrobrás) pelo Governo de Jânio Quadros, através da Lei 3.890-A. A Eletrobrás promovia estudos, projetos, e operação da Geração, Transmissão e Distribuição de energia elétrica no Brasil. A distribuição de energia elétrica era feita pelos Governos Estaduais e por pequenas empresas privadas. Foi apenas em 1998 que foi criado o Sistema Interligado Nacional (SIN), que atualmente interliga eletricamente todas as regiões do Brasil em um só sistema. ( ; OLIVEIRA, 2005).

A partir do ano de 1995 nasce uma outra fase do SEB. Nessa época o Governo Federal elaborou o que chamou de reestruturação do setor elétrico (Projeto RESEB), desmembrando as atividades do Setor Elétrico Brasileiro, desverticalizando-o e abrindo-o às privatizações. Essa reestruturação surgiu como solução ao desequilíbrio econômico-financeiro observado, uma vez que devido ao desequilíbrio fiscal do Estado novos investimento não aconteciam. Foram criadas, nesse modelo, através da Lei 9.074/1995 as figuras do Produtor Independente de Energia (PIE) que comercializa energia elétrica por sua conta e risco, ou seja, assume o risco pelo investimento realizado, bem como as exposições do mercado de curto prazo. Também foi criada a figura do Consumidor Livre, que são os consumidores com demanda acima de 3 MW que podem contratar energia diretamente com geradores e comercializadores de energia (TOLMASQUIM, 2011).

Foi através da Lei 9.074/95 que foi criado a figura do comercializador de energia elétrica, os quais podem comprar energia através de contratos bilaterais no Ambiente Livre, podendo vender energia aos consumidores livres, no próprio Ambiente de Contratação Livre, ou aos distribuidores através dos leilões do Ambiente de Contratação Regulado.

Finalmente, durante os anos de 2003 e 2004, o Governo Federal lançou as bases de um novo modelo para o Setor Elétrico Brasileiro, sustentado pela Lei nº 10.847/04, que deu origem à Empresa de Pesquisa Energética (EPE) dentre outras



providencias, Lei nº 10.848/04 e pelo Decreto nº 5.163/04, que dispõe e regula sobre a comercialização de energia elétrica, criando o ACR e o ACL dentre outras providencias.

Esse Novo Modelo do Setor Elétrico Brasileiro, que se deu definitivamente no ano de 2005, surgiu como um aperfeiçoamento da reestruturação elaborada pelo Governo anterior e teve como objetivo desenvolver uma coordenação institucional entre os órgãos setoriais; desenvolver um planejamento estrutural e captação de recursos privados para a expansão do sistema elétrico (TOLMASQUIM, 2011).

### 2.3 A INSERÇÃO DA GERAÇÃO EÓLICA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

A redação dada pelo Decreto 9.143 de 2017, regula a compra de energia elétrica, pelas distribuidoras a partir de fontes eólicas, além de PCH's e biomassa, contratadas na primeira etapa do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA). Também regula a compra de energia, por parte das distribuidoras, de fontes de geração distribuída.

O início de crescimento da geração eólica na matriz energética brasileira, deu-se principalmente através do PROINFA (Lei 10.438, de 26 de abril de 2002), que vigorou entre os anos de 2002 até final de 2010. Esse programa subsidiava os empreendimentos eólicos, feito por rateio dos custos entre os consumidores, através de cotas recolhidas pelas distribuidoras. A Eletrobrás garantia modalidade de tarifa feedin<sup>6</sup>. O resultado do PROINFA foi expressivo, fazendo com que a potência instalada de fonte

---

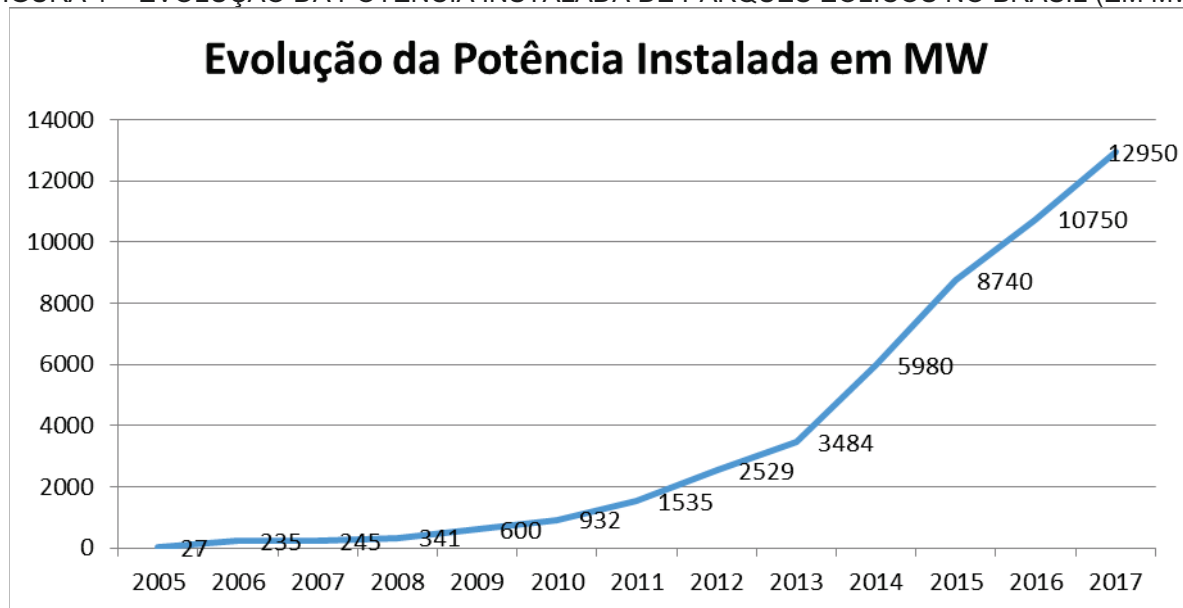
<sup>6</sup> A Feed-In-Tariff (FIT) são tarifas estabelecidas com contratos de longo prazo, geralmente maiores que 15 anos, para a geração por fonte renovável de energia. O valor da tarifa (em unidades monetárias por kWh) é estabelecido com base no custo de geração. O incentivo à produção de energia vem do fato de que o valor pago pela energia injetada na rede é maior que o da energia comprada da distribuidora. Esse mecanismo vai sendo reduzido ao longo do tempo, para incentivar a redução do custo de geração. O montante arrecadado pela tarifa-prêmio pago pela energia elétrica gerada pela fonte renovável é repassado aos consumidores.

eólica no Brasil aumentasse de 22 MW em 2003 para cerca de 1000 MW em 2011. (BRASIL. Ministério de Minas e Energia, 2016)<sup>7</sup>.

Além do PROINFA, os empreendimentos eólicos também contam com o financiamento do Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES), com financiamentos de até 80% do investimento e pagamentos amortizados em 12 anos, conforme Revista Valor Econômico<sup>8</sup>.

Conforme dados da Annual Wind Power Generation Report 2016, foram obtidas as FIGURAS 1 e 2 a seguir, indicando o crescimento e participação dessa fonte na Matriz Elétrica Brasileira:

FIGURA 1 – EVOLUÇÃO DA POTÊNCIA INSTALADA DE PARQUES EÓLICOS NO BRASIL (EM MW)

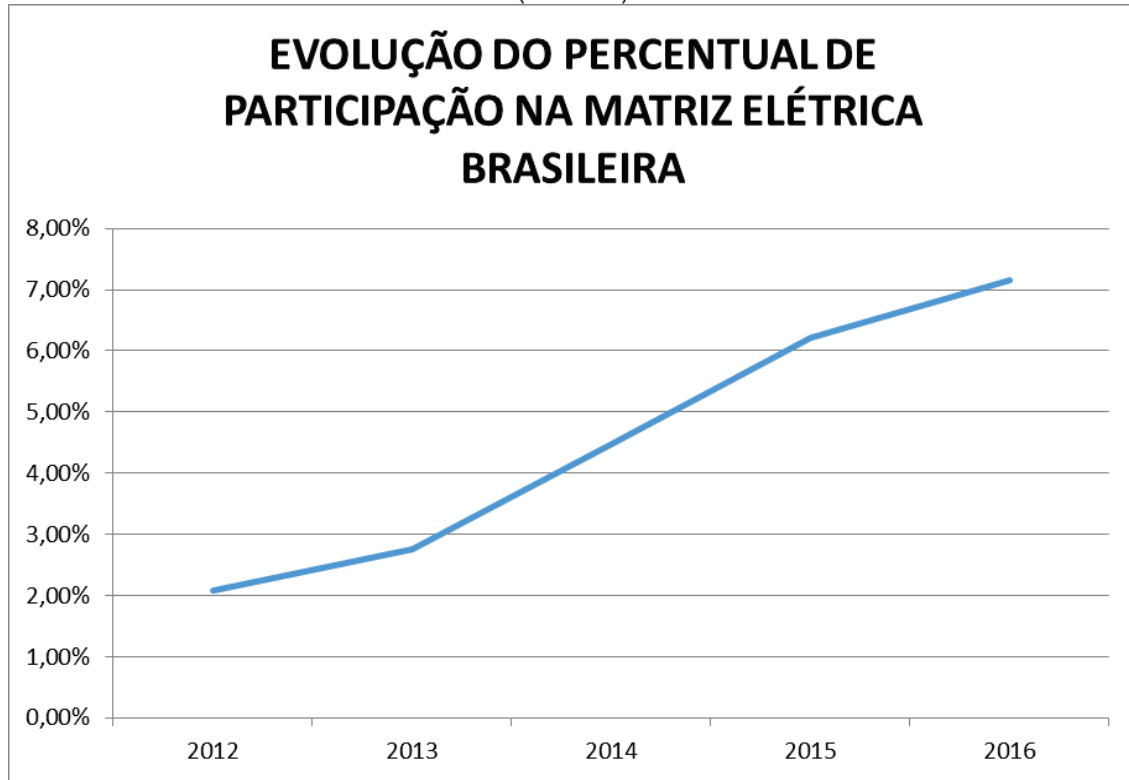


Fonte: Autor, 2018

<sup>7</sup> BRASIL. Ministério de Minas e Energia. 2016. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/documents/10584/3894319/Energia+E%C3%B3lica+-+ano+ref++2015+\(3\).pdf/f5ca897d-bc63-400c-9389-582cd4f00ea2](http://www.mme.gov.br/documents/10584/3894319/Energia+E%C3%B3lica+-+ano+ref++2015+(3).pdf/f5ca897d-bc63-400c-9389-582cd4f00ea2). Acesso em: 10 out. 2017.

<sup>8</sup> VALOR. BNDS divulga regras para financiamento de geradores eólicos. 2012. Disponível em: <http://www.valor.com.br/brasil/2938250/bndes-divulga-regras-para-financiamento-de-geradores-eolicos>. Acesso em: 10 out. 2017.

FIGURA 2 – EVOLUÇÃO DO PERCENTUAL DE PARTICIPAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA (EM MW)



Fonte: Autor, 2018

Conforme Gannoum (2015), a competitividade da indústria eólica pode ser visualizada pela queda do valor médio de investimento (CAPEX total), o qual foi reduzido em quase 50% entre 2007 e 2015. Apenas para exemplificar, o valor inicial de R\$ 6 milhões por MW instalado (PROINFA) foi reduzido para R\$ 3,5 milhões por MW instalado nos leilões de 2011. Tal redução se justifica em grande parte pela revolução tecnológica que a indústria sofreu nos últimos anos e, especialmente, pela massiva entrada de fabricantes de aerogeradores no Brasil, principalmente a partir de 2009, quando o número de fabricantes passou de 2 e atingiu 10, em 2014. Com os novos desafios enfrentados pela fonte eólica a partir de 2013, os investimentos rondam os R\$ 4,5 milhões por MW.

## 2.4 PERSPECTIVAS DE CRESCIMENTO

Segundo projeções contidas no Annual Wind Power Generation Report 2016, nos próximos 3 anos, a participação de fontes renováveis na capacidade instalada de geração elétrica no SIN crescerá mais de 30% de 13.226 MW em 2017 para 17.299 MW em 2022.

A perspectiva de crescimento da capacidade instalada por fonte de geração renovável no horizonte entre 2016 e 2024 é exibida na TABELA 1.

TABELA 1 – PERSPECTIVA DE CRESCIMENTO DA CAPACIDADE INSTALADA POR FONTE DE GERAÇÃO RENOVÁVEL NO HORIZONTE ENTRE 2016 E 2024

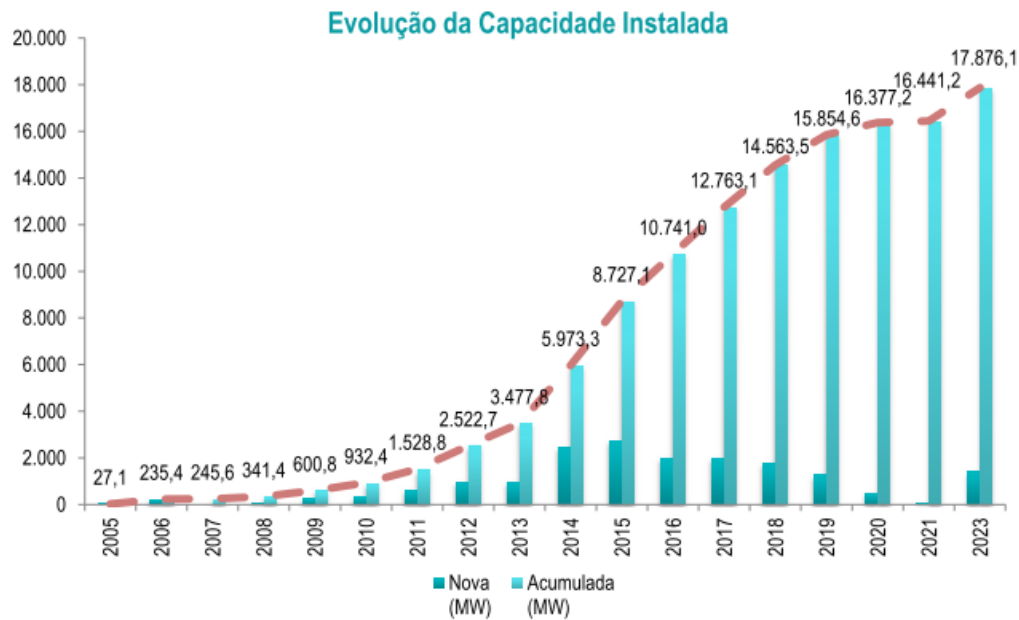
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
<b>TIPO DE FONTE</b>	<b>MW</b>								
<b>RENOVÁVEIS</b>	127.866	135.486	142.972	145.177	145.560	151.554	158.102	165.460	173.417
<b>NÃO RENOVÁVEIS</b>	22.082	22.092	22.493	26.714	28.230	29.430	30.630	31.830	33.030
<b>TOTAL</b>	149.948	157.578	165.465	171.891	173.790	180.984	188.732	197.290	206.447
	<b>PARTICIPAÇÃO RELATIVA (%)</b>								
<b>RENOVÁVEIS</b>	85,30%	86,00%	86,40%	84,50%	83,80%	83,70%	83,70%	83,80%	84,00%
<b>NÃO RENOVÁVEIS</b>	14,70%	14,00%	13,60%	15,50%	16,20%	16,30%	16,30%	16,20%	16,00%
<b>TOTAL</b>	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Fonte: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). PDE2024, 2016.

Conforme a Tabela 1, o Brasil se manterá em uma posição relevante no cenário internacional, no que diz respeito a participação de fontes renováveis na capacidade instalada de geração elétrica, pois o país continuará com uma matriz relativamente limpa.

No gráfico apresentado na Figura 1 pode-se observar a projeção da evolução de potência instalada de eólicas no Brasil, em GW.

FIGURA 3 - PROJEÇÃO DA EVOLUÇÃO DE POTÊNCIA INSTALADA DE EÓLICAS NO BRASIL, EM MW.



Fonte: ABEEOLICA, 2016.

Como se pode observar, a projeção do crescimento das fontes eólicas na matriz elétrica brasileira é significativa, saindo de 12,76 GW no final de 2017 para 17,88 GW em 2023.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fonte eólica continua crescendo no Brasil, seja por incentivos, dentre eles o desconto na TUSD e TUST, seja pelo apelo ambiental ou pelo reduzido tempo de construção se comparado as outras fontes. Com o fim do PROINFA e preços melhores do que no ACR, percebe-se cada vez mais participação de fontes eólicas no ACL. No entanto, ressalta-se que, o investidor, ao entrar no Ambiente de Contratação Livre, deve considerar que as fontes eólicas são voláteis, ou seja, expõe o investidor aos riscos de exposição no Mercado de Curto Prazo, comprometendo sua receita. Frente a essa

realidade é importante desenvolver mecanismos que mitiguem esses riscos de exposição.

### **3 APLICAÇÃO DA TEORIA DE MARKOWITZ NA ESCOLHA DE CARTEIRAS ÓTIMAS DE PARQUES EÓLICOS COMPLEMENTARES**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

Esse capítulo apresenta a Teoria de Markowitz e faz uma revisão da tese de Miguel (2016) a fim de contribuir com a expansão da aplicação da sua metodologia. Também fornece os fundamentos da metodologia do presente trabalho de pesquisa.

Sendo que fontes eólicas são voláteis e com o intuito de proteger o investidor das exposições de curto prazo, quando no Ambiente de Contratação Livre, a tese de doutorado de Miguel (2016) propôs a aplicação da Teoria de Portfólios de Markowitz, aplicada no mercado financeiro para seleção de carteiras ótimas de ações a fim de proteger o investidor de prejuízos. Ou seja, carteiras que mantêm um determinado retorno, mas com menores riscos é o propósito dessa teoria, aplicada agora no mercado brasileiro de energia eólica.

#### **3.2 TEORIA DE PORTFÓLIOS DE MARKOWITZ**

Essa teoria foi apresentada em 1952. Ela auxilia na escolha eficiente dentre várias carteiras possíveis, formando uma composição de menor risco.

Escolhendo títulos que não se comportam da mesma maneira, a teoria de portfólios de Markowitz mostra aos investidores como reduzir seu risco. A Teoria também é chamada de modelo de média-variância devido ao fato de que é baseada nos retornos esperados (média) e no desvio padrão (variância) das várias carteiras. Harry Markowitz fez as seguintes suposições ao desenvolver sua Teoria, conforme Markowitz (1959):

1. O risco de uma carteira é baseado na variabilidade dos retornos da referida carteira.
2. Um investidor tem aversão ao risco.
3. Um investidor prefere aumentar o consumo.
4. A função de utilidade do investidor é convexa e crescente, devido à sua aversão ao risco e preferência de consumo.
5. A análise é baseada no modelo de investimento de um único período.
6. Um investidor maximiza o retorno de sua carteira para um dado nível de risco ou maximiza seu retorno para o risco mínimo.
7. Um investidor é de natureza racional.

Para escolher a melhor carteira de uma série de carteiras possíveis, cada uma com retorno e risco diferentes, duas decisões separadas devem ser tomadas:

1. Determinação de um conjunto de carteiras eficientes.
2. Seleção da melhor carteira dentro do conjunto eficiente.

Mostrando que poderia se conseguir uma combinação mais eficiente avaliando a relação risco versus retorno, Harry Markowitz revolucionou o mercado financeiro da época, que acreditava que o melhor investimento era concentrar todo o capital em ativos que rendessem o melhor retorno possível. Ressaltando com isso a importância da diversificação para os investimentos financeiros. Como Markowitz usou a relação entre média, desvio padrão e correlação, é comum encontrar referências na literatura denominando-a de teoria da Média-Variância Portfólio (MVP) (FERNANDES, 2013; MIGUEL, 2014).

Segundo a teoria de Markowitz, o retorno esperado para um conjunto de ativos é calculado pela média ponderada de cada ativo individual. Já o risco destas carteiras irá depender da variância de cada ativo e de sua covariância (ou correlação) calculada dois a dois (MIGUEL, 2014).



Matematicamente, a relação dos retornos de uma carteira é dada por:

$$\bar{R}_c = \sum_{i=1}^n x_i \bar{R}_i \quad (\text{equação 1})$$

onde:

$x_i$  - é a proporção do ativo presente no portfólio, com  $i$  variando de 1 até  $n$ ;

$\bar{R}_c$  - é o retorno esperado da carteira;

$\bar{R}_i$  - é o retorno esperado para o ativo  $i$ ;

Já o risco do portfólio, com respeito à covariância, é calculado da seguinte forma:

$$\sigma_c^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_i x_j \sigma_i \sigma_j \rho_{ij} \quad (\text{equação 2})$$

ou usando a correlação:

$$\sigma_c^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_i x_j \sigma_i \sigma_j \rho_{ij} \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

$x_i$  - peso relacionado ao ativo  $i$ ;

$x_j$  - peso relacionado ao ativo  $j$ ;

$\sigma_c^2$  - é a variância da carteira;

$\sigma_i$  e  $\sigma_j$  - é o desvio padrão esperado para os ativos  $i$  e  $j$ ;

$\rho_{ij}$  – correlação entre o ativo  $i$  e o ativo  $j$ ;

Em suma, a teoria de Markowitz sugere que para um portfólio diversificado, seu retorno irá corresponder à média ponderada do retorno de cada ativo. Porém, o risco do portfólio estará abaixo da média ponderada da variância de cada ativo pertencente a carteira, devido a diversificação. Assim, Markowitz criou um modelo matemático para auxiliar na composição ótima de carteiras cujo valor futuro é incerto (FERNANDES, 2013).

Através destas equações é possível criar vários portfólios ótimos, um para cada nível de risco. Plotando o retorno esperado pelo risco encontrado nestas equações temos a fronteira eficiente.

### 3.3 DETERMINAÇÃO DO CONJUNTO EFICIENTE

Segundo Markowitz (1959), uma carteira que dê retorno máximo para um dado risco, ou risco mínimo para determinado retorno é uma carteira eficiente. Assim, as carteiras são selecionadas da seguinte forma:

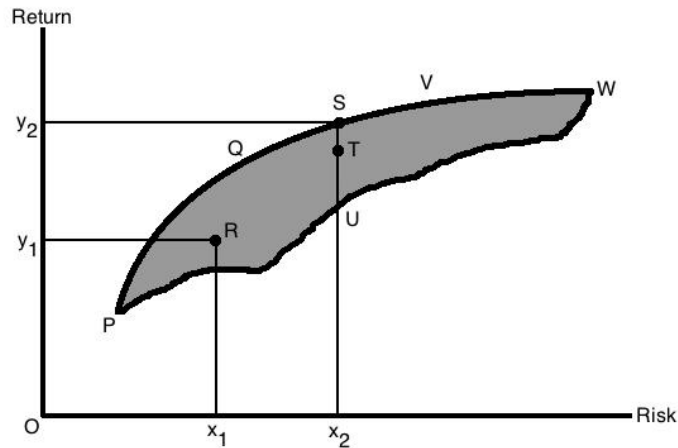
(A) Das carteiras com o mesmo retorno, o investidor preferirá a carteira com menor risco, e

(B) Das carteiras que têm o mesmo nível de risco, um investidor preferirá a carteira com maior taxa de retorno.

O investidor, de maneira geral, espera ter maior retorno e menor risco. No gráfico apresentado na Figura 2 a área sombreada PVWP inclui todos os títulos possíveis em que um investidor pode investir. As carteiras eficientes são as que se encontram na fronteira da PQVW. Por exemplo, no nível de risco  $x_2$ , há três carteiras S, T, U. Mas o portfólio S é chamado de carteira eficiente, pois tem o maior retorno,  $y_2$ , em

comparação com T e U. Todas as carteiras que se encontram na fronteira de PQVW são carteiras eficientes para um determinado nível de risco.

FIGURA 4 - RISCO VS RETORNO DE UM POSSÍVEL PORTFÓLIO MARKOWITZ (1959)



Fonte: Markowitz (1959).

O limite PQVW é chamado de fronteira eficiente. Todas as carteiras que se situam abaixo da fronteira eficiente possuem retorno menor para o dado risco. Os portfólios que se encontram à direita da fronteira eficiente não seriam suficientemente bons, pois há um risco maior para uma determinada taxa de retorno. Todas as carteiras situadas na fronteira do PQVW são denominadas Carteiras Eficientes. A fronteira eficiente é a mesma para todos os investidores, pois todos os investidores querem retorno máximo com o menor risco possível e são avessos ao risco.

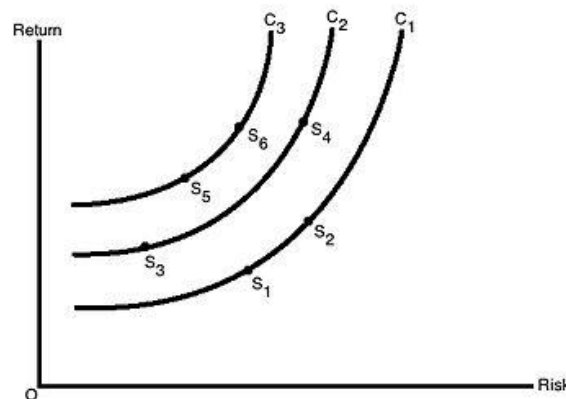
### 3.4 ESCOLHENDO O MELHOR PORTFÓLIO

Conforme Securato (2007), para a seleção do portfólio ideal ou do melhor portfólio, são analisadas as preferências risco-retorno. Um investidor que é altamente avesso ao risco terá uma carteira na parte inferior esquerda da fronteira, e um investidor

que não é demasiado avesso ao risco vai escolher uma carteira na parte superior da fronteira.

A Figura 3 mostra a curva de indiferença risco-retorno para os investidores. As curvas de indiferença C1, C2 e C3 são mostradas. Cada um dos diferentes pontos em uma determinada curva de indiferença mostra uma combinação diferente de risco e retorno, que proporcionam a mesma satisfação para os investidores. Cada curva à esquerda representa maior utilidade ou satisfação. O objetivo do investidor seria maximizar sua satisfação, movendo-se para uma curva que é maior. Um investidor pode ter satisfação representada por C2, mas se sua satisfação / utilidade aumenta, ele então se desloca para a curva C3. Assim, em qualquer ponto do tempo, um investidor será indiferente entre as combinações S1 e S2 ou S5 e S6.

FIGURA 5 - CURVA DE INDIFERENÇA RISCO VS RETORNO

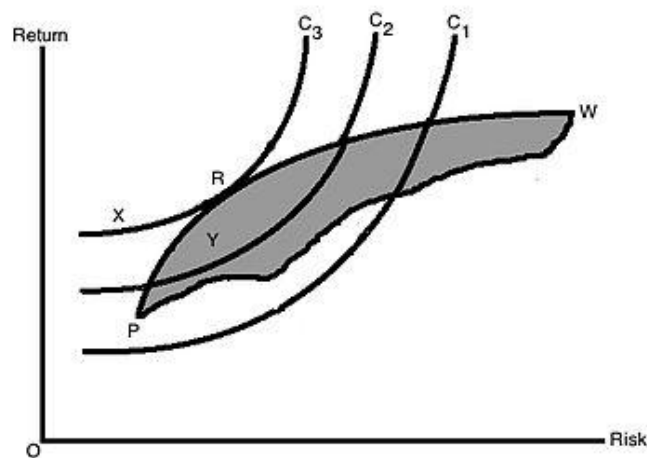


Fonte: Markowitz (1959).

A carteira ótima do investidor é encontrada no ponto de tangência da fronteira eficiente com a curva de indiferença. Este ponto marca o nível mais alto de satisfação que o investidor pode obter. Isso é mostrado na Figura 4. R é o ponto onde a fronteira eficiente é tangente à curva de indiferença C3 e também é uma carteira eficiente. Com esta carteira, o investidor obterá a mais alta satisfação, bem como a melhor combinação risco-retorno (uma carteira que oferece o maior retorno possível para uma

determinada quantidade de risco). Qualquer outro portfólio, seja X, não é a carteira ideal, mesmo que esteja na mesma curva de indiferença, pois está fora da carteira viável disponível no mercado. O portfólio Y também não é ótimo, uma vez que não está na melhor curva de indiferença viável, embora seja uma carteira de mercado viável. Outro investidor com outros conjuntos de curvas de indiferença pode ter algum portfólio diferente como sua melhor carteira.

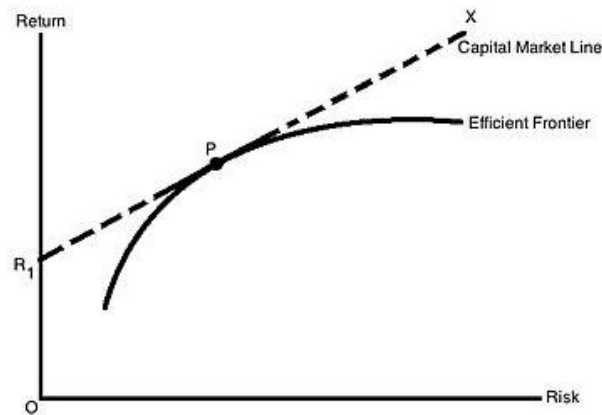
FIGURA 6 - PORTFOLIO EFICIENTE



Fonte: Markowitz (1959)

Até o momento, todas as carteiras foram avaliadas apenas em termos de títulos de risco e é possível incluir títulos sem risco numa carteira. Uma carteira com títulos sem risco permitirá que um investidor alcance um nível mais alto de satisfação. Isto está explicitado no FIGURA 7.

FIGURA 7 - A COMBINAÇÃO DE VALORES LIVRES SEM RISCO COM A FRONTEIRA EFICIENTE E LINHA DO MERCADO DE CAPITALIS



Fonte: Markowitz (1959)

Onde  $R_1$  é o retorno livre de risco, ou o retorno de títulos públicos, uma vez que esses títulos são considerados como não tendo nenhum risco para fins de modelagem.  $R_1PX$  é desenhado de modo que é tangente à fronteira eficiente. Qualquer ponto na linha  $R_1PX$  mostra uma combinação de diferentes proporções de títulos sem risco e carteiras eficientes.

No caso de um investidor ter investido todos os seus fundos, fundos adicionais podem ser emprestados à taxa livre de risco e uma combinação de carteira que se encontra em  $R_1PX$  pode ser obtida.  $R_1PX$  é conhecida como Linha do Mercado de Capitais (LMC). Esta linha representa a compensação risco-retorno no mercado de capitais. A LMC é uma curva inclinada para cima, o que significa que o investidor assumirá maior risco se o retorno da carteira também for maior. A carteira P é a carteira mais eficiente, já que se encontra tanto na LMC como na Fronteira Eficiente, e cada investidor preferiria atingir essa carteira, P. A carteira P é conhecida como Carteira de Mercado e também é a carteira mais diversificada.

Conforme Markowitz (1959), no mercado de carteiras que consiste em títulos de risco e sem risco, a LMC representa a condição de equilíbrio. A Linha do Mercado de Capitais diz que o retorno de uma carteira é a taxa livre de risco mais o prêmio de risco.

Prêmio de risco é o produto do preço de mercado do risco e da quantidade de risco, e o risco é o desvio padrão da carteira.

A equação de LMC é:

$$R_P = I_{RF} + (R_M - I_{RF}) \cdot \sigma_P / \sigma_M \quad (\text{equação 4})$$

Onde,

$R_P$  = retorno esperado da carteira

$R_M$  = retorno da carteira de mercado

$I_{RF}$  = taxa de juros livre de risco

$\sigma_M$  = desvio padrão da carteira de mercado

$\sigma_P$  = desvio padrão da carteira

A relação  $(R_M - I_{RF}) / \sigma_M$  é a inclinação da LMC. O termo  $(R_M - I_{RF})$  é uma medida do prêmio de risco, ou a recompensa por manter carteira de risco em vez de carteira sem risco.  $\sigma_M$  é o risco da carteira de mercado. Portanto, o declive mede a recompensa por unidade de risco de mercado.

As características da LMC são:

1. Na tangente, ou seja, Carteira P, é a combinação ideal de investimentos de risco e a carteira de mercado.
2. LMC é sempre ascendente inclinado como o preço do risco tem que ser positivo. Um investidor racional não vai investir a menos que ele sabe que ele será compensado por esse risco.

### 3.5 APLICAÇÃO DA TEORIA DE MARKOWITZ PARA A SELEÇÃO DE PORTFÓLIOS EÓLICOS

Na tese de Miguel (2016) foi aplicada a teoria de Markowitz para a seleção de portfólios de projetos de geração elétrica de fontes eólicas, PCHs e usinas de biomassa. Na tese foram consideradas restrições, tais como: o número pré-estabelecido

de ativos, limite do fluxo de potência por área, limite orçamentário, recursos energéticos disponíveis, dentre outras. Foi desenvolvido uma metodologia de apoio à decisão para seleção de carteiras ótimas, considerando a complementariedade das fontes e complementariedade espacial, baseada em medidas de risco e teoria de portfólios, considerando diversas restrições ao problema.

Foi proposto então, baseado na teoria de portfólios de Markowitz, uma metodologia de identificação de carteira ótima de projetos de geração, sobre a fronteira eficiente, que minimize a volatilidade da geração no curto prazo, reduzindo os riscos da operação energética ou a volatilidade mensal da geração, reduzindo os custos com a exposição ao mercado de curto prazo.

A presente dissertação utiliza-se dos dados de medição da tese de Miguel (2016), para cada coordenada correspondente.

### 3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tese de Miguel (2016) foi um trabalho pioneiro na formação de portfólio complementar de parques eólicos no Brasil.

A partir dos desenvolvimentos propostos e dados disponíveis, foram identificadas as carências e propostas novas técnicas e procedimentos capazes de permitir a análise e verificar a possibilidade de se utilizar históricos de períodos mais curtos para a formação das carteiras ótimas de portfolios de parques eólicos, conforme descrito em detalhes no próximo capítulo.



## 4 METODOLOGIA PROPOSTA

### 4.1 INTRODUÇÃO

Esse capítulo irá apresentar a metodologia proposta. Está baseada na metodologia apresentada no capítulo anterior, que é a aplicação da teoria de Markowitz para a seleção de portfólios eólicos, porém visando a obtenção da carteira ótima de usinas eólicas complementares.

Para isso, é apresentado a composição dos dados de entrada, dados estatísticos de velocidade do vento, tipo de gerador usado, fórmula para transformar velocidade do vento em energia e método estatístico utilizado. Finalmente o capítulo contempla um roteiro dos passos correspondentes à metodologia proposta com vistas ao entendimento do processo de obtenção dos resultados alcançados.

### 4.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DA METODOLOGIA PROPOSTA

A presente proposta fundamenta-se na aplicação da teoria de Markowitz num processo de variação dos dados de entrada para encontrar a composição das carteiras otimizadas de parques eólicos complementares.

A teoria de Markowitz será aplicada para encontrar carteiras otimizadas, conforme metodologia desenvolvida neste capítulo. Essas carteiras são compostas por coordenadas geográficas de ventos complementares, onde potencialmente poder-se-ia instalar parques eólicos.

Para aplicação da teoria de Markowitz nas simulações, usou-se a ferramenta do Portopt do Matlab. Essa ferramenta é aplicada através do comando: [risco, ret, pesos] = portopt (m,c,nc). Como resultado da simulação, tem-se uma planilha de Pesos, representando o percentual de cada usina na composição de cada carteira, e uma planilha de Risco vs Retorno, que são utilizadas para compor os gráficos através do Excel.

Quando montada a fronteira de Markowitz, qualquer carteira dentro dessa curva terá maior retorno que outra, dado o mesmo risco. Isso é demonstrado com os gráficos da fronteira eficiente, apresentados no Capítulo 5, que compara duas carteiras com o mesmo risco, sendo uma sobre a fronteira e outra fora da fronteira. O retorno da primeira será superior ao retorno da segunda e o risco da primeira será inferior ao retorno da segunda. Isso demonstra que há uma seleção ótima.

#### 4.3 DADOS DE ENTRADA

A metodologia proposta está também calcada em um conjunto de dados de entrada que são compostos pelas séries históricas de vento e também da curva característica do aerogerador selecionado. Há empresas que comercializam dados meteorológicos para a aplicação em energia. Este é o caso da Vortex, que é uma empresa sediada em Barcelona, na Espanha, que comercializa soluções de suporte relacionadas a tecnologias eólicas, solar e *offshore* para diversos fins. Particularmente para dados de vento, a empresa trabalha com um portfólio de produtos como sistemas específicos para o posicionamento de torres meteorológicas, projetos de fazendas eólicas e séries históricas de dados.

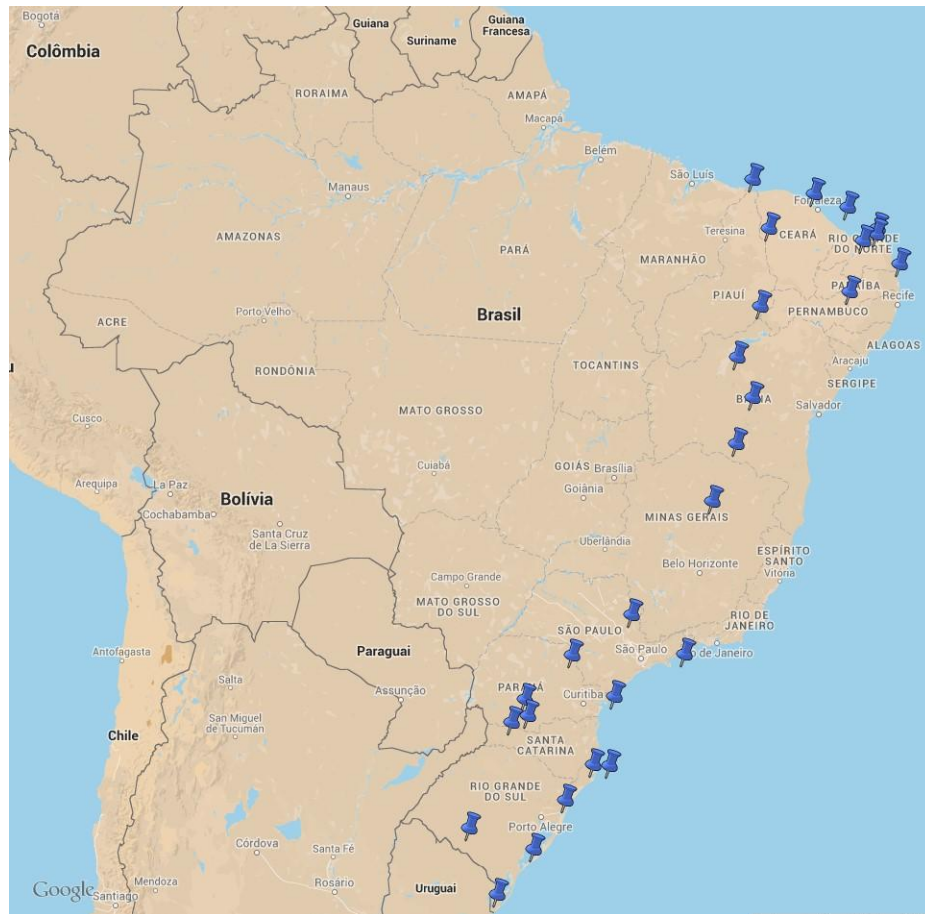
Skamarock et al (2008) ressaltam que os dados fornecidos pela Vortex não são provenientes de medições diretas, mas de modelos matemáticos, o que reduz enormemente a possibilidade de erros humanos ou de equipamentos medidores. Esses dados, fornecidos pela empresa Vortex consideram uma altura de 100 metros, base horária e histórico de 21 anos (de 01/01/1994 até 31/12/2014).

A Vortex também fornece a série de densidade do ar, permitindo o cálculo da geração da energia elétrica de uma maneira mais precisa. A Tabela 2 apresenta os dados de vento de cada coordenada analisada, que foram coletados através do mapeamento feito no território nacional, conforme Miguel (2016).

Na FIGURA 8 é apresentado um mapeamento de coordenadas de ventos localizados no território nacional, relacionado aos dados da Tabela 2. Foram

selecionados dados de 22 coordenadas geográficas, distribuídas nas áreas de maior potencial eólico e próximas ao sistema de transmissão existente.

FIGURA 8 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS COORDENADAS SELECIONADAS DO VORTEX



Fonte: Medeiros et al, 2015.

TABELA 2 - DADOS DE VENTOS DAS COORDENADAS

Série	Velocidade Média Horária (m/s)	Desvio Padrão da Velocidade Horária (m/s)	Mediana da Velocidade Horária (m/s)	Outliers (%)	Zeros (%)
Parnaíba	9,45	2,22	9,50	7,95	0,00
Parada	7,66	1,93	7,80	16,00	0,00
São João	8,72	1,82	8,80	22,62	0,00
Medonho	8,67	2,41	8,70	2,33	0,00
Macambira	8,76	1,85	8,80	7,14	0,00
Forquilha	7,62	1,93	7,60	2,62	0,00
Tavares	6,25	1,57	6,30	5,29	0,05
Sertania	6,50	1,77	6,50	2,14	0,00
Afrânio	8,75	3,23	9,20	0,00	0,14
Palmas	6,87	3,00	5,10	1,14	0,33
Quilombo	5,38	3,06	4,70	16,81	0,81
Tubarão	5,89	3,06	6,80	0,57	0,48
Osório	7,08	3,59	5,00	38,67	0,24
Dom Pedrito	6,51	2,83	5,60	0,90	0,90
Estreito	7,71	3,15	6,80	16,33	0,14
Palmar	7,50	2,92	7,50	23,90	0,14
Itaguaçu	5,37	2,28	5,30	0,00	0,57
Boninal	6,98	2,13	7,00	0,05	0,05
Jacaraci	6,63	2,05	3,80	5,14	0,05
Olho D'água	3,90	1,83	3,60	3,48	0,86
Riachuelo	3,79	1,81	5,50	13,86	0,86
Anta	3,89	2,55	3,40	43,52	2,81

Fonte: Miguel, 2016.

A TABELA 2 contém, portanto, os dados estatísticos referentes à velocidade horária do vento para cada uma das 22 coordenadas, considerando o histórico de vento entre os anos de 1994 a 2014. Na primeira coluna tem-se a velocidade média amostral do vento, em metros por segundo, na segunda coluna o desvio padrão amostral de cada leitura, e na terceira coluna a mediana amostral desses dados. Os resultados são exibidos em termos de percentuais de *outliers* na quarta coluna, que são os valores atípicos, fugindo muito dos padrões das medições. O cálculo dos outliers são apresentados na tese de Miguel (2016). Por fim, a última coluna exhibe o percentual de dados zerados em cada uma das coordenadas no período estudado.

Os *outliers* não foram descartados porque verificou-se que não houve descontinuidade nos ventos. Quanto mais carteiras forem inseridas nas simulações, mais ajustada fica a curva de fronteira ótima aos pontos de *outliers*.

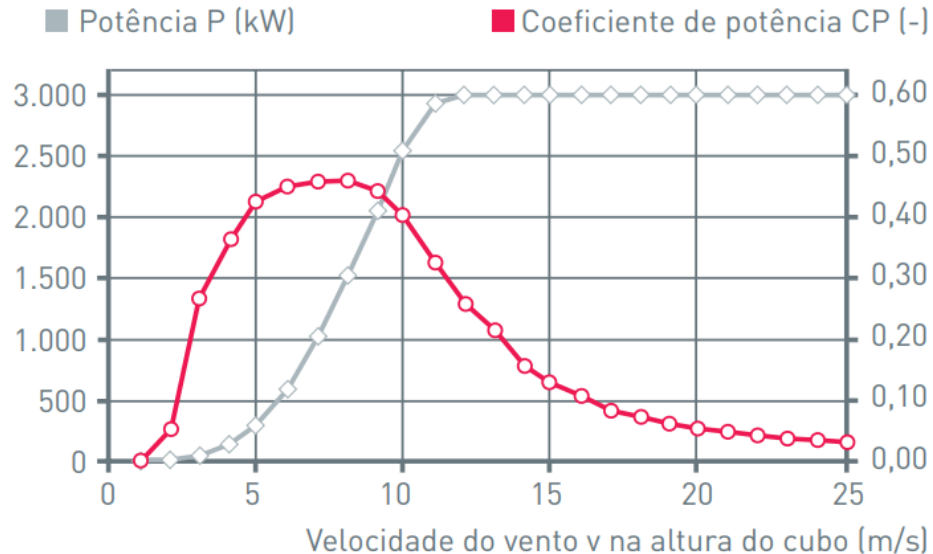
O que se observa é que as coordenadas mais ao Sul e afastadas do litoral apresentam as menores velocidades médias de ventos. A exceção é a estação Medonho (na tríplice divisa entre os Estados do Piauí, Pernambuco e Bahia) que, mesmo estando no interior do continente, apresenta velocidades de vento elevadas. De um modo geral, o litoral Nordeste apresenta as maiores velocidades médias, seguido do litoral do Estado do Rio Grande do Sul.

Os dados zerados podem significar tanto *outliers* como períodos sem ventos. Isso pode ficar mais evidente na coordenada de Afrânio, onde não foram detectados *outliers* e, ainda assim, 0,14% da série é formada por zeros. Itaguaçu é outro exemplo de um caso semelhante. Naturalmente, a quantidade de zeros está diretamente relacionada com a magnitude das velocidades médias em cada coordenada. Quanto mais baixa a velocidade dos ventos, maior o percentual de zeros.

Na presente pesquisa, as simulações de geração de energia foram feitas considerando aerogeradores da Wobben/Enercon. Conforme Miguel (2016), o aerogerador Wobben/Enercon possui maior expectativa de geração e menor relação risco/retorno. Nesse sentido, para o atendimento de uma determinada demanda, o aerogerador Wobben/Enercon exigirá menos potência instalada (investimentos) que os demais. Alternativamente, para um parque eólico com a mesma potência instalada, o parque composto por aerogeradores Wobben/Enercon irão produzir mais energia em média que os demais fabricantes. O equipamento selecionado foi Wobben/Enercon E-115, potência nominal de 2500 kW, diâmetro do rotor 115,70 metros.

A seguir a curva de potência calculada, fornecida pelo fabricante:

FIGURA 9 - CURVA DE POTÊNCIA CALCULADA



Fonte: Wobben WindPower, 2017.

Quando os ventos atingem o patamar de velocidade de 25 m/s, a geração de energia é interrompida por motivos de segurança das estruturas, isso se chama *cut off* ou velocidade de corte. Nota-se que, além da potência máxima gerada, a faixa de ventos entre 5 e 15 m/s é onde ocorre o maior coeficiente de potência e onde a potência chega a saturação. Isso é importante porque esse intervalo concentra a maioria dos registros de velocidade.

Para transformar velocidade do vento horária em energia horária, existem duas maneiras: uma é consultando a curva do fabricante de velocidade vs potência. No entanto, essa curva considera o Coeficiente de Potência (CP) variando com a velocidade, causando algumas imprecisões. Portanto, o ideal, e que foi adotado na metodologia proposta, é determinar um CP para cada ponto da curva de potência, obedecendo a fórmula apresentada na equação 5:

$$E = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot CP \quad (\text{equação 5})$$

onde:

*E*: Geração Eólica Média Horária ( $W_{médios}$ ), nesse caso é considerado igual à energia gerada num intervalo de tempo  $t$  devido ao período de tempo empregado, que é horário;

*p*: massa específica do ar ( $kg/m^3$ );

*A*: área de seção transversal ( $m^2$ ), que no gerador Enercon é de  $10.515,5 m^2$ ;

*v*: velocidade média horária do vento ( $m/s$ ).

*CP*: coeficiente de potência do fabricante, que represente o rendimento do aerogerador.

Como  $1 \text{ Watt} = \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$  e as séries históricas são de base horária, o resultado dos cálculos são em  $W_{médios}$ . Watt médio é a unidade de produção energética igual a energia produzida pela operação contínua de um megawatt de capacidade durante um período de tempo. O W médio é calculado por meio da razão Wh/h, onde Wh representa a energia produzida e h representa a quantidade de horas do período de tempo no qual a referida quantidade de energia foi produzida. Assim, 1W médio em 1 ano =  $1W \times 8760 \text{ horas} = 8.760 \text{ Wh}$ ; 1W médio no mês de janeiro representa  $1W \times 744 \text{ horas} = 744 \text{ Wh}$ .

Para a obtenção das curvas de fronteira eficiente, foi utilizado o Portopt, que é uma rotina própria do Matlab. Através da formulação de Markowitz, o Portopt faz a otimização de dados, resolvendo problemas básicos de portfólios, minimizando os seus riscos. Assim, a partir da indicação do período que se quer analisar (tranches) e, tendo a média e covariância dos retornos dos ativos como dados de entrada, a rotina apresenta como resultado as carteiras eficientes e a partir delas é traçada a curva de fronteira eficiente. Será, portanto, na curva de fronteira eficiente que devem estar situadas as carteiras ótimas. Esta fronteira pode ser descrita como o conjunto de carteiras ótimas correspondentes a certo conjunto de ativos, onde cada carteira possui um nível mínimo de risco dado certo nível de retorno. Portanto, os investidores se concentram apenas nas carteiras que compõe esta fronteira, desprezando as demais carteiras por apresentarem retornos inferiores com um mesmo nível de risco (BRUM, 2008; FERNANDES, 2013).

A carteira ótima é formada por carteiras de parques eólicos complementares na geração de energia e que conseguem ao final maximizar a geração da energia contratada ou diminuir os riscos de exposição financeira. Sendo assim, nota-se que não é seguro formar uma carteira com apenas 1 parque eólico, pois caso haja falta de vento, compromete-se o contrato de venda, correndo o risco de não entregar a energia prometida. Além disso, o gerador pode sofrer multas e exposição no mercado de curto prazo, obrigando-o a comprar a energia pelo preço vigente no mercado, podendo ser mais caro que o preço firmado em contrato de venda de energia. No entanto quando uma carteira é formada por um conjunto de parques eólicos, na falta de vento em determinada região, será complementado com ventos em outras regiões, compensando e possibilitando honrar o contrato minimizando os ônus para o gerador, criando-se assim um mecanismo de complementação que qualifica a carteira como ótima, situando-a na curva de fronteira eficiente.

A seguir são apresentados, de forma sucinta, os principais passos da metodologia proposta para obtenção de carteiras ótimas.

*Passo 1:* primeiramente, são obtidos os dados de ventos da Vortex, e selecionadas 22 coordenadas, conforme TABELA 2.

*Passo 2:* em seguida, esses são transformados em geração, ou seja, são transformados em energia, unidade MWh, através da equação (5), apresentada na seção anterior.

*Passo 3:* a energia horária, em MWh, é transformada em energia mensal, em MWmédios, somando-se a energia gerada hora a hora dentro do mês e dividindo pelo número de horas total do mês analisado.

*Passo 4:* o terceiro passo consiste em executar a rotina Portopt (própria do Matlab) para obtenção do portfólio de 10 carteiras ótimas, tendo como dados de entrada os intervalos de tempo bem como dados da geração mensal, conforme descrito na seção anterior.



*Passo 5:* traçar a curva da fronteira eficiente a partir das 10 carteiras ótimas, selecionadas a partir de um amplo leque de opções, uma vez que a curva da fronteira eficiente pode conter infinitas carteiras.

*Passo 6:* com os resultados gerados no passo anterior, obter os pesos das usinas em cada carteira, o Risco e o Retorno para cada carteira obtida do Matlab.

*Passo 7:* disponibilizar esses resultados em uma planilha para geração de curvas que permitam a visualização do resultado das carteiras ótimas.

Cada um desses passos será ilustrado no próximo capítulo, permitindo o detalhamento e esclarecimento de cada etapa, bem como a validação da metodologia proposta.

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo, foi apresentada a metodologia de formação de carteiras ótimas.

No próximo capítulo essas informações são analisadas de forma que a se verificar a existência ou não da variação na composição de carteiras de parques eólicos entre históricos de ventos de 5 ou 20 anos, cujos dados são obtidos da empresa Vortex, gerando 4 simulações.

A análise será iniciada pela carteira 1 que é a de menor risco e menor retorno em todas as fronteiras eficientes obtidas.

## 5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Foi feito uma análise no histórico entre os anos de 1994 e 2014, dividido em tranches de 5, 10, 15 e 20 anos a fim de se abranger esse histórico num universo de iterações que pudessem ser analisados e comparados.

A seguir, o Risco e o Retorno, encontrados nas Figuras 10, 12, 14 e 16; se referem ao risco de gerar a energia esperada ou não. Já os pesos, encontrados nas Figuras 11, 13, 15 e 17, refere-se à composição de cada carteira, que contém percentuais de cada parque.

Considera-se que cada coordenada será uma usina, nas simulações, a fim de se comparar a hipotética geração de energia em cada uma dessas usinas.

### 5.2 SIMULAÇÃO 1: 5 ANOS

O tranche 1, refere-se à simulação dos dados das coordenadas com um histórico de ventos de 5 anos, abrangendo 1994 a 1998, ou seja, o histórico de vento mais curto.

Após executado o terceiro passo que consiste em executar a rotina Portopt para obtenção do portfólio ótimo, tendo como dados de entrada o histórico de energia de cada intervalo de tempo, obtém-se as 10 carteiras ótimas, selecionadas a partir dos dados de coordenadas.

O resultado é apresentado na seguinte TABELA 3, que apresenta o risco e o retorno da carteira de menor risco e menor retorno, no tranche 1:

TABELA 3 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

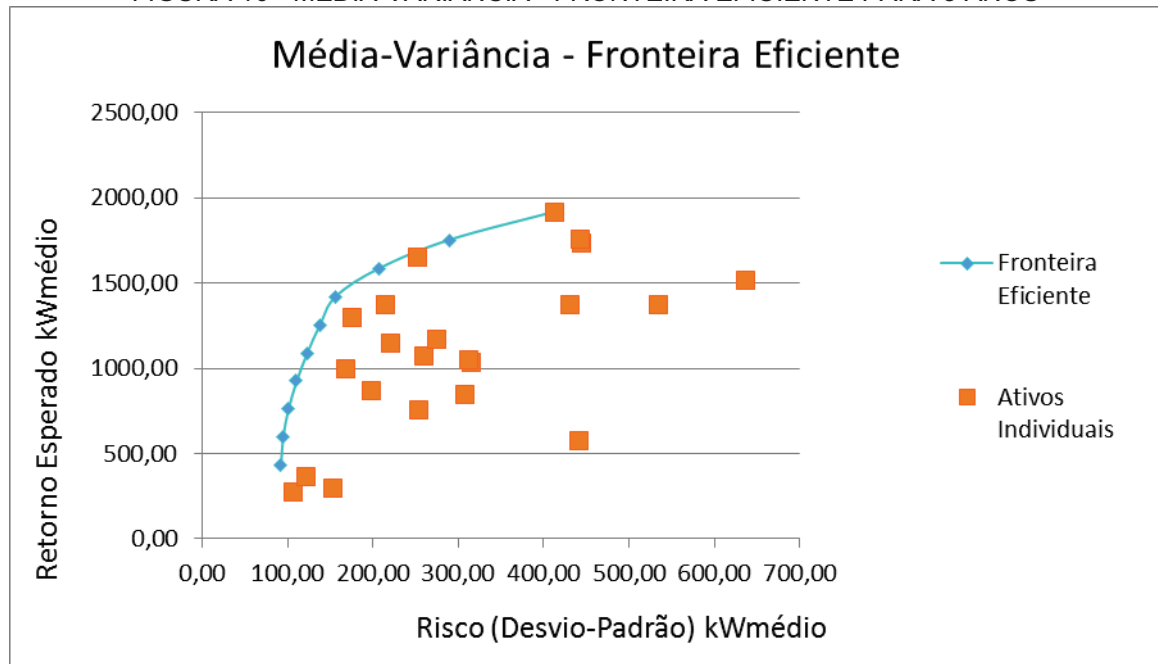
Portfólio Ótimo	RISCO (kWmédio)	RETORNO (kWmédio)
Carteira 1	92	431
Carteira 2	94	596
Carteira 3	100	761
Carteira 4	110	925
Carteira 5	123	1090
Carteira 6	138	1255
Carteira 7	156	1420
Carteira 8	207	1585
Carteira 9	289	1749
Carteira 10	413	1914

Fonte: Autor, 2017.

A FIGURA 10 apresenta o gráfico de retorno esperado por risco (desvio padrão), que é obtido como resultado do Passo 6, apresentado no Capítulo 4, do algoritmo proposto. Como pode-se perceber na Figura 9, representados pelos pontos alaranjados estão os ativos individuais. Em azul tem-se a curva correspondente às carteiras compostas dos ativos individuais, formando a fronteira eficiente.

Utilizou-se 10 carteiras dentro a curva da fronteira eficiente, que é formada por infinitas carteiras.

FIGURA 10 - MÉDIA-VARIÂNCIA - FRONTEIRA EFICIENTE PARA 5 ANOS

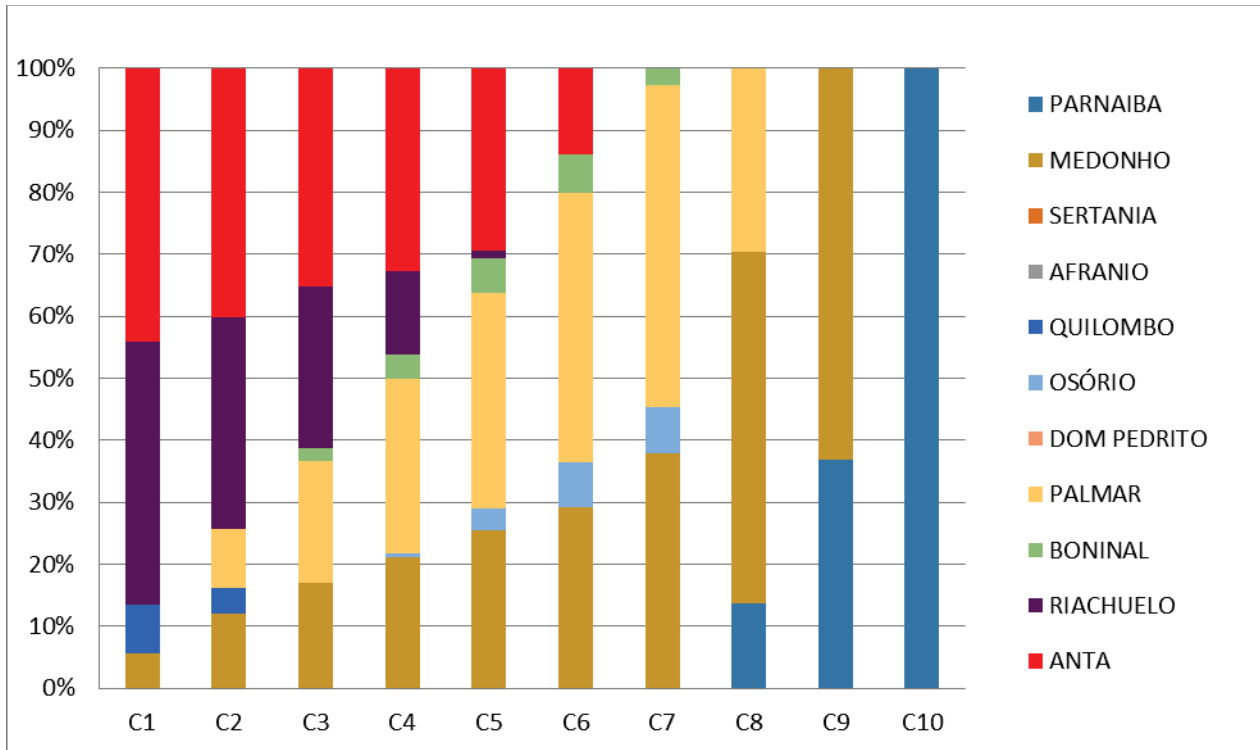


Fonte: Autor, 2017.

Verifica-se que o Risco aumenta à medida que o Retorno também aumenta, gerando a curva ótima, ou fronteira eficiente. Os ativos individuais ficam abaixo da fronteira eficiente, isto é, uma vez que esses ativos compõem essa carteira, sua posição individual deve ser de menor retorno do que a composição ótima.

Na FIGURA 11 é apresentado o gráfico de composição das 10 carteiras geradas.

FIGURA 11 - COMPOSIÇÃO DE CADA CARTEIRA - PESO DAS DIFERENTES USINAS PARA 5 ANOS



Fonte: Autor, 2017

Observa-se, na FIGURA 11, no eixo das abcissas as 10 carteiras ótimas escolhidas e no eixo das ordenadas o percentual de potência de cada empreendimento na carteira, ou seja, o quanto de cada coordenada, percentualmente, compõe cada carteira. Esses percentuais foram obtidos através da rotina especificada no capítulo anterior, ou seja, na composição de cada carteira existe um percentual de participação de cada usina que somados compõe 100% da carteira.

Sendo assim, será tomada a carteira 1, de menor risco e menor retorno para todas as simulações, como referência nos comparativos das simulações de um tranche com outro. Temos que na simulação no tranche 1 sua composição é a seguinte:

TABELA 4 - COMPOSIÇÃO DA CARTEIRA 1 NO TRANCHE 1

CARTEIRA	MEDONHO	QUILOMBO	RIACHUELO	ANTA
1	5,69%	7,83%	42,44%	44,04%

Fonte: Autor, 2017

Neste tranche de 5 anos, a carteira 1 é composta pelas usinas de Medonho, Quilombo, Riachuelo e Anta. A seguir, será analisado o comportamento dessa carteira 1 no segundo tranche. Os parques de Quilombo, Riachuelo e Anta tem um peso, juntos de 94,31% na composição da carteira 1 no tranche 1.

### 5.3 SIMULAÇÃO 2: 10 ANOS

O tranche 2 refere-se à simulação dos dados das coordenadas com um histórico de ventos de 10 anos, 1994 a 2003.

Assim como no caso anterior, após executado o terceiro passo que consiste em executar a rotina Portopt, para obtenção das 10 carteiras ótimas, tendo como dados de entrada o histórico de energia de cada intervalo de tempo, selecionadas a partir dos dados de coordenadas.

O resultado é apresentado na TABELA 5, que apresenta o risco e o retorno para a carteira de menor risco e retorno no tranche 2:

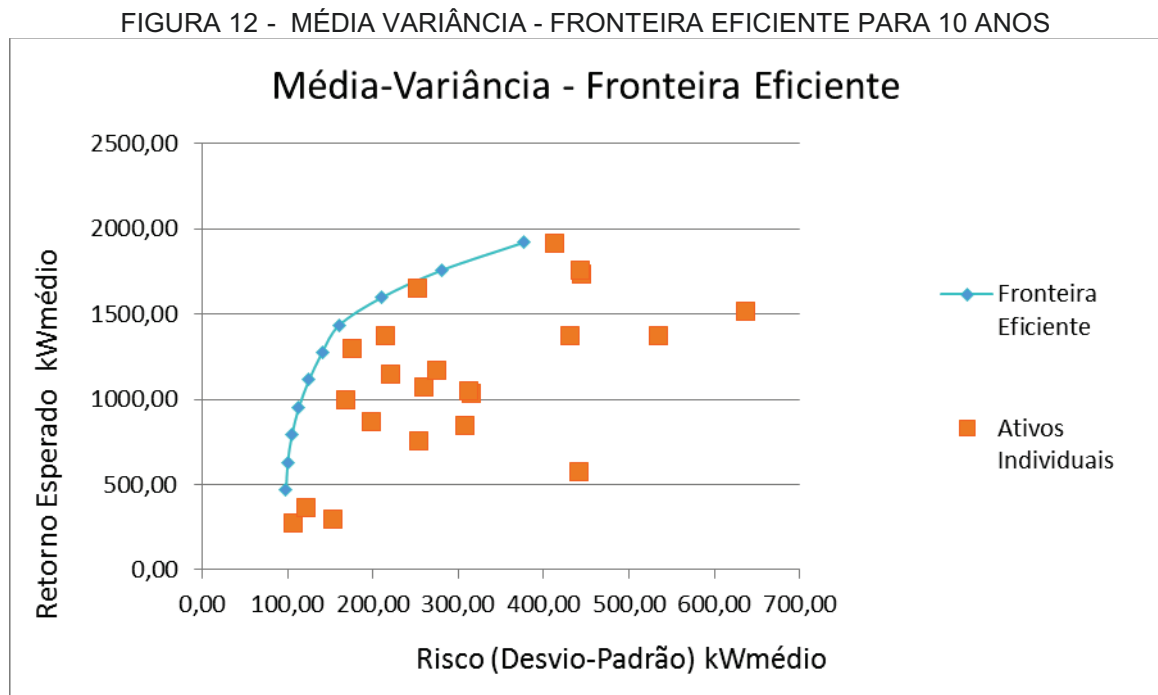
TABELA 5 - RESULTADOS DO TRANCHE 2

Portfólio Ótimo	RISCO (kWmédio)	RETORNO (kWmédio)
1	98	468
2	100	630
3	105	791
4	113	952
5	125	1113
6	140	1274
7	160	1436
8	210	1597
9	281	1758
10	377	1919

Fonte: Autor, 2017.

Nota-se na TABELA 5 que houve uma alteração nos valores de risco e retorno para a carteira 1.

A FIGURA 12 apresenta o gráfico de retorno esperado por risco (desvio padrão), novamente obtido como resultado do passo 6 do algoritmo proposto:

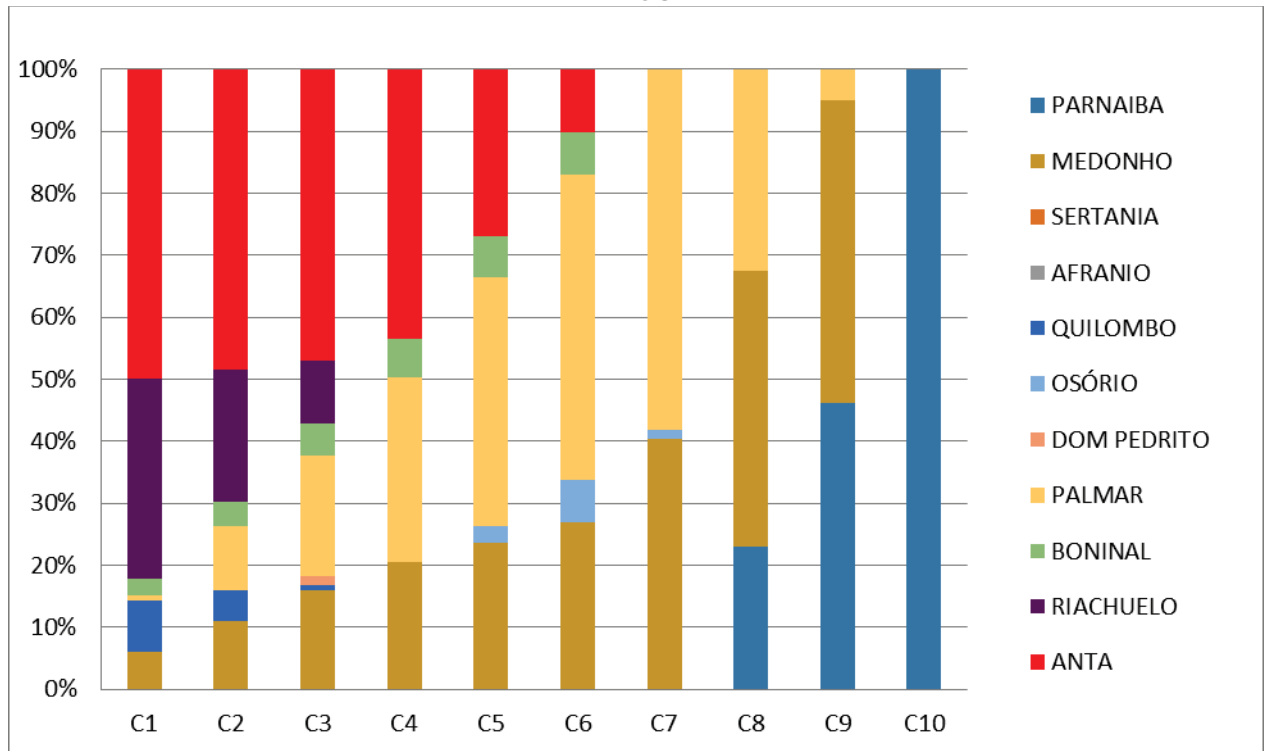


Fonte: Autor, 2017

Nessa FIGURA 12 observa-se os ativos individuais, em pontos alaranjados. Em azul tem-se a curva de fronteira eficiente, formada pelas 10 carteiras ótimas geradas pelo Matlab.

Na FIGURA 13, é apresentado o gráfico de composição de cada carteira.

FIGURA 13 - COMPOSIÇÃO DE CADA CARTEIRA - PESOS DAS DIFERENTES USINAS PARA 10 ANOS



Fonte: Autor, 2017

Observa-se no eixo das abscissas as 10 carteiras ótimas geradas pelo Matlab e no eixo das ordenadas o percentual de cada empreendimento na carteira, ou seja, o quanto de cada usina, percentualmente, compõe cada carteira.

Para se analisar detalhadamente a carteira 1, apresenta-se sua composição na TABELA 6:

TABELA 6 - COMPOSIÇÃO DA CARTEIRA 1 NO TRANCHE 2

CARTEIRA	MEDONHO	QUILOMBO	PALMAR	BONINAL	RIACHUELO	ANTA
1	5,97%	8,38%	0,79%	2,74%	32,22%	49,89%

Fonte: Autor, 2017.



Analisando-se as Tabelas 4 e 6, percebe-se diferença entre a composição da carteira 1 no tranche 1 e no tranche 2. Na carteira 1, no tranche 2, percebe-se que houve o acréscimo de duas usinas: Palmar e Boninal, além da mudança nos pesos dos parques de Medonho, Quilombo, Riachuelo e Anta na participação da carteira 1. No entanto, mantém-se Medonho, Quilombo, Riachuelo e Anta com uma participação de 96,46% na composição da carteira.

#### 5.4 SIMULAÇÃO 3: 15 ANOS

O tranche 3, refere-se à simulação dos dados das coordenadas com um histórico de ventos de 15 anos, do ano 1994 até 2008.

O resultado é apresentado na TABELA 7, que apresenta o risco e o retorno para a carteira de menor risco e menor retorno, no tranche 3:

TABELA 7 - RESULTADOS DO TRANCHE 3

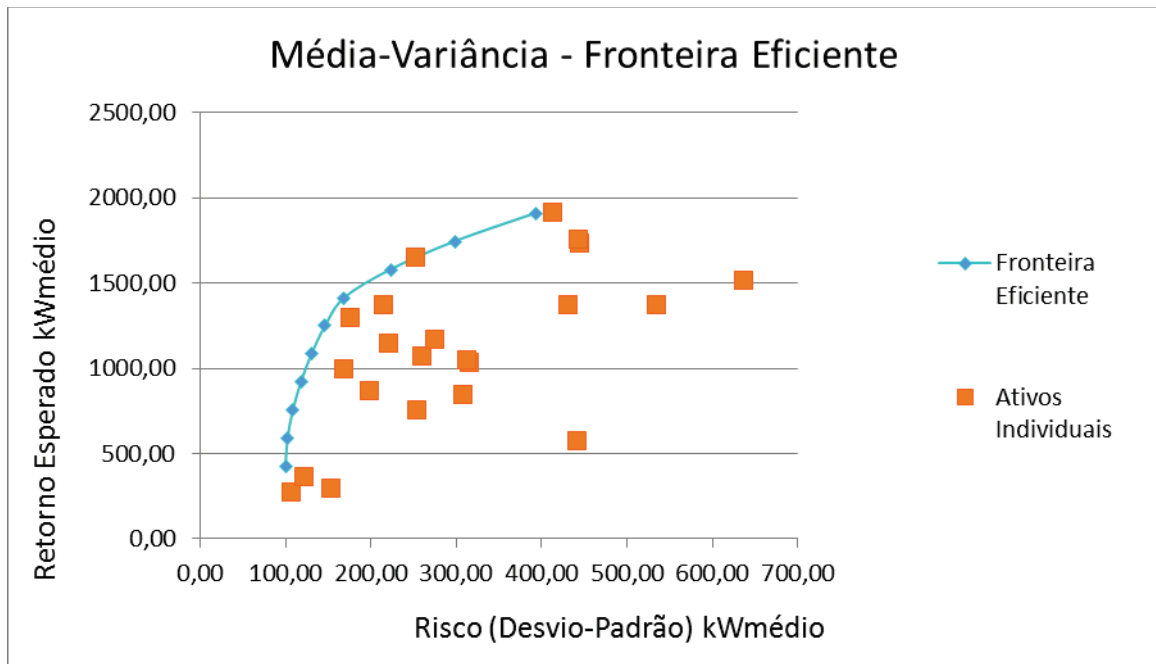
Portfólio Ótimo	RISCO (kWmédio)	RETORNO (kWmédio)
1	100	425
2	102	589
3	108	754
4	118	919
5	130	1084
6	146	1248
7	169	1413
8	223	1578
9	298	1743
10	393	1908

Fonte: Autor, 2017.

Nota-se na TABELA 7 que houve uma alteração na configuração de Risco e Retorno para cada carteira.

A FIGURA 14 é composta de forma idêntica às anteriores.

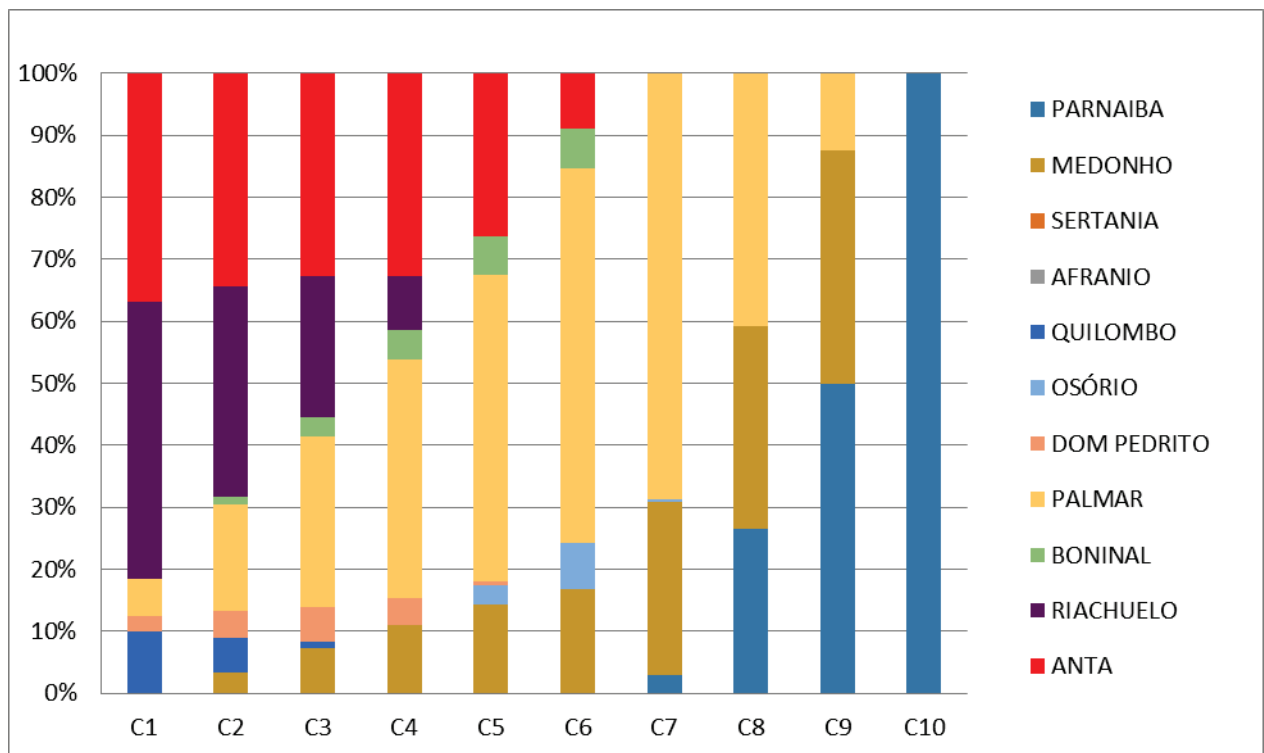
FIGURA 14 - MÉDIA VARIÂNCIA - FRONTEIRA EFICIENTE PARA 15 ANOS



Fonte: Autor, 2017

Na FIGURA 15, é apresentado o gráfico de composição de cada carteira.

FIGURA 15 - COMPOSIÇÃO DE CADA CARTEIRA - PESO DAS DIFERENTES USINAS PARA 15 ANOS



Fonte: Autor, 2017

Tem-se, o eixo das abcissas representando as dez carteiras ótimas geradas e o eixo das ordenadas representando o peso de cada empreendimento em cada carteira, ou seja, o quanto de cada usina, percentualmente, compõe cada carteira.

Analisando detalhadamente a carteira 1, observa-se sua composição na Tabela 8:

TABELA 8 - COMPOSIÇÃO DA CARTEIRA 1 NO TRANCHE 3

CARTEIRA	QUILOMBO	DOM PEDRITO	PALMAR	RIACHUELO	ANTA
1	10,01%	2,49%	5,95	44,76%	36,78%

Fonte: Autor, 2017.

Analisando-se as TABELAS 6 e 8, percebe-se, uma diferença na composição da carteira 1 entre os tranches 2 e 3. Na carteira 1, no tranche 3, percebe-se que houve o acréscimo de uma usina: Dom Pedrito, ao mesmo tempo que as usinas Medonho e Boninal não fazem mais parte da carteira 1. Além disso, ocorreu mudança nos pesos de participação dos parques remanescentes na referida carteira. Mantém-se Quilombo, Riachuelo e Anta, da primeira formação, com participação de 91,55% na formação da carteira 1.

### 5.5 SIMULAÇÃO 4: 20 ANOS

Para dar suporte aos resultados anteriores, o tranche 4, referente a simulação da carteira com um histórico de ventos de 20 anos, de 1994 até 2014, foi realizada.

O resultado é apresentado na TABELA 9.

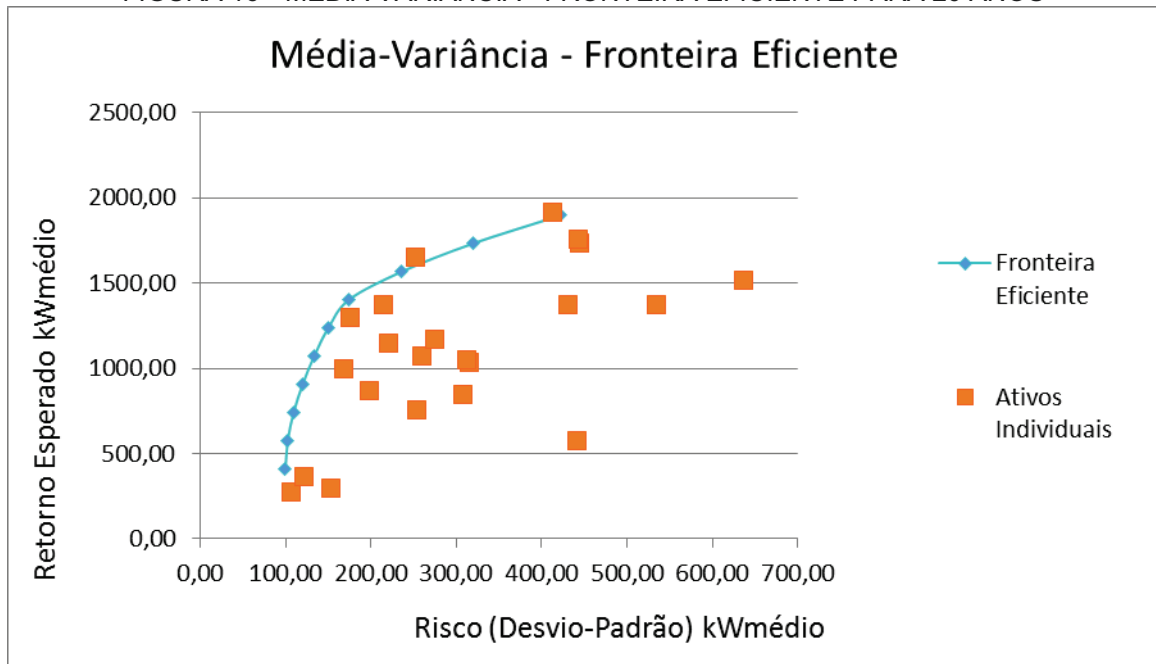
TABELA 9 - RESULTADOS DO TRANCHE IV

Portfólio Ótimo	RISCO (kWmédio)	RETORNO (kWmédio)
1	100	411
2	102	576
3	109	742
4	120	907
5	133	1072
6	150	1237
7	174	1403
8	236	1568
9	319	1733
10	422	1899

Fonte: Autor, 2017.

A FIGURA 16 é composta de forma idêntica às FIGURAS 10, 12 e 14.

FIGURA 16 - MÉDIA VARIÂNCIA - FRONTEIRA EFICIENTE PARA 20 ANOS

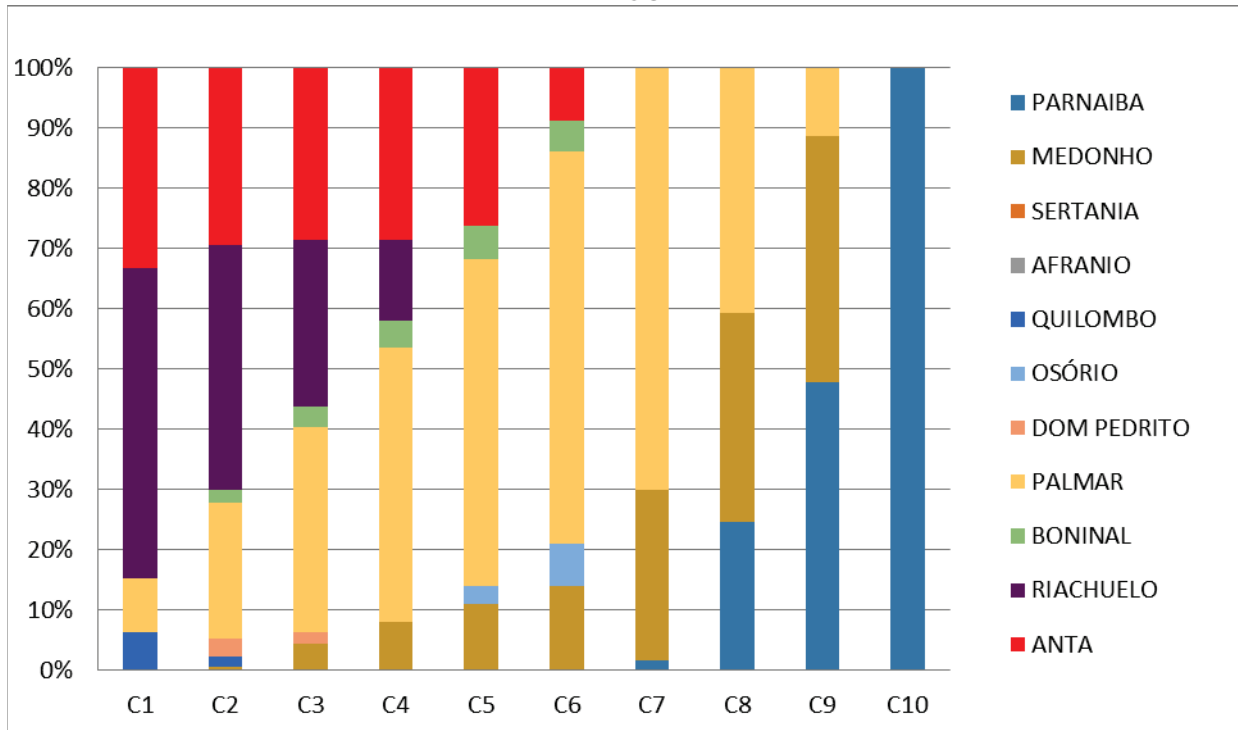


Fonte: Autor, 2017.

A FIGURA 17 apresenta o quanto de cada usina, percentualmente, compõe cada carteira.

Duas carteiras ficam, aparentemente, acima da curva da fronteira eficiente, mas esse efeito mudaria se se incluísse mais pontos de carteiras ótimas na curva, ajustando-a de maneira que englobasse todos os ativos individuais.

FIGURA 17 - COMPOSIÇÃO DE CADA CARTEIRA - PESO DAS DIFERENTES USINAS PARA 20 ANOS



Fonte: Autor, 2017

Analisando detalhadamente a carteira 1, observa-se sua composição em cada simulação gerada, na TABELA 10:

TABELA 10 - VARIAÇÃO DA CARTEIRA 1 AO LONGO DOS TRANCHES

PESOS DOS PARQUES NA CARTEIRA 1 AO LONGO DOS TRANCHES							
60 MESES							
CARTEIRA	MEDONHO	DOM PEDRITO	QUILOMBO	PALMAR	BONINAL	RIACHUELO	ANTA
1	5,69%	-	7,83%	-	-	42,44%	44,04%
120 MESES							
CARTEIRA	MEDONHO	DOM PEDRITO	QUILOMBO	PALMAR	BONINAL	RIACHUELO	ANTA
1	5,97%	-	8,38%	0,79%	2,74%	32,22%	49,89%
180 MESES							
CARTEIRA	MEDONHO	DOM PEDRITO	QUILOMBO	PALMAR	BONINAL	RIACHUELO	ANTA
1	-	2,49%	10,01%	5,95%	-	44,76%	36,78%
240 MESES							
CARTEIRA	MEDONHO	DOM PEDRITO	QUILOMBO	PALMAR	BONINAL	RIACHUELO	ANTA
1	-	-	6,24%	9,02%	-	51,45%	33,29%

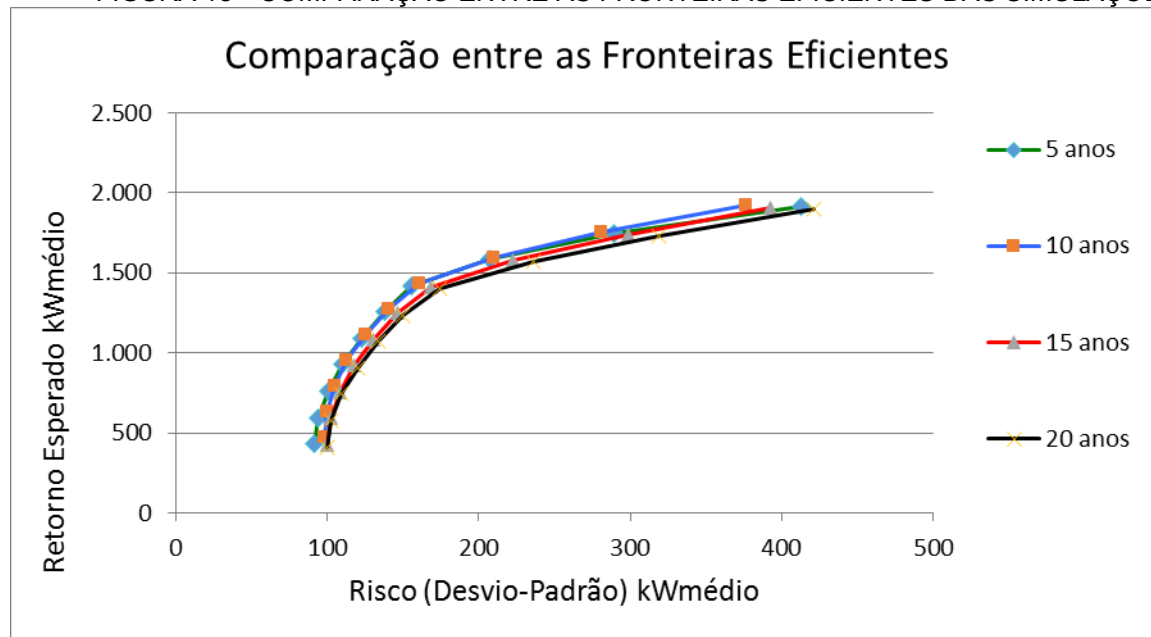
Fonte: Autor, 2017.

Percebe-se, portanto, que a composição da carteira 1 varia nos tranches 1, 2, 3 e 4. Porém três usinas se mantêm na composição da carteira o longo dos 4 tranches: Quilombo, Riachuelo e Anta. Juntas, elas compõem 90,98% da carteira 1 no tranche 4 e 94,31 no tranche 1.

## 5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A FIGURA 18 apresenta uma comparação entre as fronteiras eficientes de todos os cenários analisados.

FIGURA 18 - COMPARAÇÃO ENTRE AS FRONTEIRAS EFICIENTES DAS SIMULAÇÕES



Fonte: Autor, 2017.

Percebe-se que os gráficos correspondentes às Fronteiras Eficientes apresentam uma pequena alteração ao se analisar dados de 5 ou 20 anos. Da mesma forma, o peso que cada empreendimento tem na composição das carteiras ótimas apresentaram poucas variações.

Nas simulações apresentadas anteriormente, observou-se que ao longo das janelas temporais, apesar de ocorrer uma pequena mudança na composição das carteiras, sofrendo entradas e saídas de diferentes parques eólicos, mantém-se sempre parques que somados, representam um peso significativo que se mantém a cada tranche, contribuindo com um importante percentual de composição de cada carteira, nunca inferior a 88%.

Isso sugere a possibilidade da contratação de um histórico de 5 anos de vento para empreendimentos de parques eólicos complementares, pois apresentam um comportamento muito similar.

Uma outra forma de observar a composição da carteira 1 ao longo dos tranches, são as FIGURAS 11, 13, 15 e 17, apresentadas em barras, que mostram a similitude no peso da participação de cada parque eólico nessa carteira.

Portanto, verificou-se que o histórico de ventos de 5 anos mostrou-se suficiente para se assegurar uma carteira ótima em todas as carteiras analisadas.



## 6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS

As fontes de energia eólica têm aumentado sua participação na matriz elétrica brasileira, de maneira substancial nos últimos anos. O crescimento desse tipo de fonte tomou força com o PROINFA e sua participação nos leilões regulados vêm crescendo muito desde então. Recentemente, a participação de fontes de energia eólica também tem crescido no Ambiente de Contratação Livre. Muitos trabalhos têm focado a solução para mitigação de risco de exposição financeira dessas fontes voláteis. Dentre as soluções, encontra-se a de complementariedade com outros tipos de fontes: térmicas, hídricas, solares, bem como complementariedade entre parques eólicos.

Ao tratar-se de complementariedade entre parques eólicos, é necessário assegurar históricos consistentes de ventos a fim de prever seu comportamento, que por sua vez, formará a curva de geração. A contribuição deste trabalho está na possibilidade de obtenção dos históricos de períodos curtos de vento, mostrando finalmente que estes se apresentam viáveis para empreendimentos eólicos. Dessa forma, o investidor poderá, além de otimizar custos na obtenção de históricos de ventos, também poderá avaliar regiões com histórico de medição mais recentes, ampliando as possibilidades geográficas. A contratação de históricos longos de ventos muitas vezes não estão disponíveis por falta de medições, sendo impeditivas para o investidor.

A escolha da carteira de parques eólicos analisada nesse trabalho, deu-se em função de ser a de menor risco e menor retorno em todas as fronteiras eficientes obtidas. Essa foi a carteira 1, formada ao longo dos tranches pelas seguintes coordenadas geográficas: Medonho (Piauí), Quilombo (Santa Catarina), Riachuelo (São Paulo), Anta (Paraná), Palmar (Rio Grande do Sul), Boninal (Bahia), Dom Pedrito (Rio Grande do Sul).

Sendo assim, analisou-se o comportamento dessa carteira de risco mínimo ao longo do período de análise, que foi de 5 a 20 anos, verificando que existiu uma

pequena variação na composição dessa carteira ao longo dos 4 tranches. No entanto observou-se que três coordenadas, Quilombo, Riachuelo e Anta, se mantiveram compondo a carteira ótima ao longo dos de 20 anos, mantendo a representatividade da carteira, ou seja, no tranche 1, os três parques representaram 94,31% da composição da carteira 1. No tranche 2, 96,46%. No tranche 3, 91,55%, e no tranche 4 90,98%. Observou-se, portanto, que os três parques, Quilombo, Riachuelo e Anta, sozinhos compõem a carteira 1 em pelo menos 90,98%.

Diante disso, percebe-se que o histórico curto de ventos se mostra consistentes para formação de carteiras ótimas de parques eólicos complementares, pois a carteira 1 formada no histórico de cinco anos é muito semelhante a carteira no histórico de vinte anos. Mesmo com pequenas variações a carteira se mantém dentro da curva eficiente.

Conclui-se também que a teoria de Markowitz se apresenta como uma alternativa para a escolha de carteiras ótimas de projetos eólicos, com o objetivo de se reduzir a volatilidade de geração e consequentemente a exposições comerciais.

Para trabalhos futuros, sugere-se, utilizando da mesma metodologia, estudar a possibilidade de um Mecanismo de Realocação de Energia para parques eólicos complementares. Também se propõe para futuros estudos, averiguar se os resultados alcançados se repetem para outras carteiras, com outros cenários.

## REFERÊNCIAS

ABEEOLICA. **Annual Wind Power Generation Report**. [S.l]: ABBEÓLICA, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEL). Programa de Incentivo às Fontes Alternativas. 2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/proinfa> . Acesso em: 04 dez. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEL). Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia\\_eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf). Acesso em: 15 nov. 2017.

, J. L.; OLIVEIRA, A. **Diálogos da energia**: reflexões sobre a última década, 1994-2004. Rio de Janeiro: 7 letras, 2005.

ARFUX, G. A. B. **Gerenciamento de riscos na comercialização de energia elétrica com uso de instrumentos derivativos**: uma abordagem via teoria de portfólios de markowitz. Florianópolis: UFSC, 2004.

ÁVILA, R. M. R. **Otimização da operação voltada ao negócio de usinas eólica e PCH**. Curitiba: UFPR, 2013.

BLOOT, M. L. U

. Curitiba: UFPR, 2011.

BRASIL. **Decreto 5.163 de 30 de julho de 2004**. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2004/decreto/d5163.HTM](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5163.HTM). Acesso em: 20 out. 2017.

BRASIL. **Decreto 9.143 de 2017**. Regulamenta o § 4º do art. 27 da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, e o § 13 do art. 4º da Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995, altera o Decreto nº 5.081, de 14 de maio de 2004, o Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004, o Decreto nº 7.246, de 28 de julho de 2010, o Decreto nº 7.805, de 14 de setembro de 2012, e o Decreto nº 9.022, de 31 de março de 2017, para dispor sobre a concessão e a comercialização de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2017/decreto/D9143.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/decreto/D9143.htm). Acesso em: 05 nov. 2017.

BRASIL. **Lei 10.438, de 26 de abril de 2002**. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de

Desenvolvimento Energético (CDE). Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/2002/L10438.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/2002/L10438.htm). Acesso em: 06 nov. 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). 2016. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/documents/10584/3894319/Energia+E%C3%B3lica+-+ano+ref++2015+\(3\).pdf/f5ca897d-bc63-400c-9389-582cd4f00ea2](http://www.mme.gov.br/documents/10584/3894319/Energia+E%C3%B3lica+-+ano+ref++2015+(3).pdf/f5ca897d-bc63-400c-9389-582cd4f00ea2). Acesso em: 10 out. 2017.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia (MME). **Anuário estatístico de energia elétrica 2016**. Brasília: EPE, 2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202016.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2017.

BRUM, F. M. Aplicação da Teoria de Markowitz e Índice de Sharpe em um Clube de Investimento. Especialização em Mercado de Capitais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul em parceria com a Apimec – sul, 2008.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Comercialização**. 2017. Disponível em: [https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/onde-atuamos/comercializacao?\\_afLoop=361531023631408#!%40%40%3F\\_afLoop%3D361531023631408%26\\_adf.ctrl-state%3D10ka9m1etn\\_4](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/comercializacao?_afLoop=361531023631408#!%40%40%3F_afLoop%3D361531023631408%26_adf.ctrl-state%3D10ka9m1etn_4). Acesso em: 10 nov. 2017.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL). **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**: simulações 2013. Rio de Janeiro: CEPEL, 2017. 51 p.

FERNANDES, D. J. S. G. Riscos e Incerteza das Fontes Renováveis na Produção de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.

FERNANDEZ, M. R.  
Campinas (SP): UNICAMP, 2010.

GANNOUN, E. S. O Desenvolvimento da Indústria de Energia Eólica no Brasil: aspectos de inserção, consolidação e sustentabilidade. CADERNOS ADENAUER XV (2014) N°3

LEITE, A. D. **A Energia do Brasil**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

MARKOWITZ, H. M. **Portfolio Selection**: Efficient Diversification of Investment. New York: John Wiley & Sons, 1959.

MEDEIROS, L. et al. **Levantamento do histórico de dados das fontes envolvidas. Relatório Técnico n.1**. Curitiba: Instituto Lactec, 2015. 36 p.

MIGUEL, F. K.

USP, 2016.

PEREIRA, R. G. de A. **A teoria de por**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2014.

RIBEIRO, M. N. **C**. São Paulo: USP, 2013.

RICOSTI, J. F. C. **I**. São Paulo: USP, 2011.

SECURATO, J. R. **Decisões Financeiras em Condições de Risco**. São Paulo: Saint Paul, 2007.

SILVA, N. F. da. **Fontes de Energias Renováveis Complementares na Expansão do Setor Elétrico Brasileiro: o caso da energia eólico..** Rio de Janeiro: UFRJ, 2006.

SKAMAROCK, W. C. et al. A Description of the advanced research WRF version 3. **NCAR Technical Note**, jun. 2008. Colorado (USA): National Center for Atmospheric Research, 2008.

TATEMOTO, K. A. **Energia Incentivada, uma análise integrada**. São Paulo: USP, 2013.

TOLMASQUIM, M. T. **TOLMASQUIM**. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2011.

TOLMASQUIM, M. T. (coord.). **Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Acesso em: 19 jan. 2017.

WOBLEN WINDPOWER. Enercon. **Catálogo do fabricante**. 2017. Disponível em: [www.wobben.com.br/porodutos/importados/e-115-300-kw/](http://www.wobben.com.br/porodutos/importados/e-115-300-kw/). Acesso em: 08 nov. 2017.

VOLPE FILHO, C. A. E.; ALVARENGA, M. . A. F. P. (ORG.). **Setor Elétrico**. Curitiba:Juruá, 2008.

## **ANEXO – INSTITUIÇÕES DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO**

Para viabilizar todas as mudanças ocorridas no Setor, desde 1995, foi necessária a criação de agentes, cada qual com suas atribuições, que pudessem fazer com que todos os processos que envolvem o Setor Elétrico pudessem ser agilizados, fiscalizados e implementados. A seguir são elencados alguns dos principais agentes do Setor Elétrico Brasileiro e suas principais atribuições conforme Volpe Filho e Alvarenga (2008).

### **Conselho Nacional de Pesquisa Energética – CNPE**

Criado pela Lei nº 9.478, de agosto de 1997, órgão presidido pelo Ministério de Minas e Energia e que assessora a Presidência da República. Tem como objetivos principais:

- Formular as políticas e diretrizes para o setor energético;
- Definir projetos estruturantes;
- Estabelecer o critério de garantia estrutural de suprimento.

### **Ministério de Minas e Energia – MME**

Criado pela Lei nº 8.422/1990, tem como principais atribuições:

- Formular e implementar as políticas para o setor energético, conforme diretrizes do CNPE;
- Faz o papel de poder concedente;
- Monitora a segurança de suprimento do Setor Elétrico por meio do Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico-CMSE;
- Define as ações para reestabelecer a segurança de suprimento em caso de desequilíbrios.

### **Empresa de Pesquisa Energética - EPE**

Criada pela Lei nº 10.847 de 2004, tem como principais atribuições:

- Realizar Estudos para definição da Matriz Energética, definindo estratégias e metas a serem alcançadas;
- Realizar estudos com vistas à expansão da geração e transmissão;
- Inventariar bacias hidrográficas, de petróleo e gás;
- Promover estudos para obtenção de licenças ambientais prévias.

### **Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico – CMSE**

Criado pela Lei 10.848, de 2004, tem a função de acompanhar e avaliar de modo permanente a continuidade e a segurança do suprimento de energia elétrica no âmbito de todo o SIN

Como principais atribuições, pode-se citar:

- Acompanhar as atividades de geração, transmissão, distribuição, comercialização, importação e exportação de energia elétrica, gás natural e petróleo e seus derivados;
- Avaliar as condições de abastecimento e de atendimento relativas às atividades relacionadas no item anterior em horizontes de tempo pré-determinados;
- Realizar, periodicamente, uma análise da segurança de abastecimento e atendimento ao mercado de energia elétrica, de gás natural e petróleo e seus derivados, de maneira integrada.

### **Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL**

A ANEEL foi criada em substituição ao antigo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE. Este último era um órgão federal, sem personalidade jurídica própria e sem independência. Sob a forma de autarquia especial, seu objetivo é o de ser uma agência reguladora setorial, com competências para a regulação técnica e econômica; fiscalizar as atividades setoriais relacionadas com as atividades de geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica.

Para que houvesse maior independência nas tomadas de decisões desta agência, os mandatos de seus dirigentes foram determinados em lei e tiveram prazo determinado.

### **Operador Nacional do Sistema – ONS**

O Operador Nacional do Sistema Elétrico-ONS é o órgão que faz a coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no âmbito do SIN.

Pessoa jurídica de direito privado, na forma de associação civil, sem fins lucrativos, o ONS foi criado em Agosto de 1998, pela Lei nº 9.648/98 e posteriormente foram feitas as alterações introduzidas pela Lei nº 10.848/04 e regulamentado pelo Decreto nº 5.081/04. Em sua constituição há representantes chamados membros associados e membros participantes. Participam empresas de geração, transmissão, distribuição, consumidores livres. Além destes, importadores e exportadores de energia e representantes do MME. ONS (2017)

O ONS faz estudos e promove ações que devem ser exercidas no Sistema Integrado Nacional e nos seus agentes, coordenando as diretrizes que devem ser seguidas para garantir o suprimento e segurança do sistema elétrico nacional.

### **Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE**

Por meio da Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, foi criada a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE, em substituição ao Mercado Atacadista de Energia - MAE. A função da CCEE consiste em realizar a contabilização e liquidação das transações de compra e venda de energia realizada entre agentes do SEB nos dois ambientes de contratação: Ambiente de Contratação Regulada - ACR e Ambiente de Livre Contratação - ACL.

Como o despacho da geração de energia é centralizado, via ONS, os contratos de comercialização de energia elétrica formalizados entre os agentes do SEB, e registrados na CCEE, são apenas instrumentos financeiros. A produção física de



energia realizada pelas usinas é totalmente desvinculada dos contratos firmados por seus proprietários.

A CCEE contabilizada a energia elétrica produzida e consumida no Brasil. Essencialmente esta contabilização considera toda a energia contratada pelos Agentes e toda a energia efetivamente verificada (consumida ou gerada), as diferenças são liquidadas no mercado de curto prazo. Em suma, a CCEE contabiliza as diferenças entre o que foi gerado, consumido e contratado.